

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Matematická simulace procesu vícenásobné plastické
deformace

Mathematical Simulation of Severe Plastic Deformation
Process

Student: Bc. Jan Steidl
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2010

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 21.5.2010


.....
Podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků práce

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2010


.....
Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

STEIDL, J. *Matematická simulace procesu vícenásobné plastické deformace: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 71 s. Vedoucí práce: Rusz, S.

V diplomové práci se zabývám matematickou simulací protlačování materiálu nástrojem DRECE ve 3D prostoru v programu Simufact.forming, provedením metalografické analýzy a tahových zkoušek na experimentálních vzorcích.

V první části je uveden přehled současných poznatků z oblasti SPD se zaměřením na proces CONFORM. V další části bylo provedeno porovnání programů matematické simulace (QForm, Simufact.forming, FormFEM). Následně byla provedena matematická simulace pásu plechu Al99,5 nástrojem DRECE v programu Simufact.forming a výpočet byl porovnán s experimentem. V další části je provedena metalografická analýza vlivu počtu průchodů na výslednou strukturu. Byly také vykonány tahové zkoušky pro vyhodnocení působení protlačovacího procesu na výsledné mechanické vlastnosti daného materiálu. V závěru diplomové práce je provedeno celkové zhodnocení dosažených výsledků.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

STEIDL, J. *Mathematical Simulation of Severe Plastic Deformation Proces: Master Thesis*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2010, 71 p. Thesis head: Rusz, S.

The thesis concerns mathematical simulation at the process compression forming material by the DRECE process tool by program Simufact.forming in 3D area and performance by metallographic analyze and tensile tests on the experiment samples.

At first part was concerned abstract actual information from SPD area about process CONFORM. There is analysis programs mathematical simulation were concerned in next part (QForm, Simufact.forming, FormFEM). Then mathematical simulation was created sheet metal Al99,5 by DRECE tool in the program Simufact.forming and simulation calculation was compare with experiment. In the next part was created metallographic analyze for evaluation textures on number passages. Tensile tests were concerned for interpretation achieved mechanical natures by process DRECE. Final part of the thesis was concerned target results.

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení	9
Seznam použitých zkratek	11
ÚVOD	12
1 SOUČASTNÉ POZNATKY Z OBLASTI SPD ZAMĚŘENÉ NA PROCES	
CONFORM.....	14
1.1 Využití technologie CONFORM k protlačování profilů z Cu	14
1.1.1 Profily z Cu vytvořeny protlačovací technologií	14
1.1.2 Analýza silových parametrů.....	14
1.1.3 Simulace toku materiálu	16
1.1.4 Zamezení vzniku vnitřních vad.....	16
1.2 Numerická analýza chování Al při procesu (CCSS/C2S2) ve 3D.....	17
1.2.1 Princip C2S2 procesu.....	18
1.2.2 Numerická simulace procesu C2S2	18
1.2.3 Geometrická analýza nástroje	21
1.2.4 Účinek tření.....	23
1.3 Mikrostruktury a tahové vlastnosti hořčíkové slitiny AZ31 tvářené procesem	
CONFORM	24
1.3.1 Materiály a experimentální postupy.....	24
1.3.2 Výsledky	25
2 POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ K VYUŽITÍ MATEMATICKÉ	
SIMULACI SPD	27
2.1 Program QForm 3D.....	27
2.2 Program FormFEM.....	29
2.3 Program Simufact.forming	30
2.4 Příklady matematické simulace provedené v programech QForm,	
Simufact.forming a FormFEM	32
2.5 Simulace protlačení litiny AlMn1Cu v programu QForm a	
Simufact.forming při více průchodech.....	33
2.5.1 Srovnání obou programů (QForm, Simufact.forming)	33
2.5.2 Celkové srovnání výsledků	35

3	MATEMATICKÁ SIMULACE PROTlačOVÁNÍ PÁSU PLECHU NÁSTROJEM DRECE	35
3.1	Technologie CONFORM.....	35
3.2	Nástroj DRECE.....	37
3.3	Srovnání procesů DRECE, CONFORM a C2S2	38
3.4	Použité materiály pro matematickou simulaci procesu DRECE	39
3.4.1	Materiál Dievar (materiál nástrojů).....	39
3.4.2	Materiál SKD 61 (materiál nástrojů)	39
3.4.3	Materiál Al 99,5 (materiál vzorku)	40
3.5	Parametry pro matematickou simulaci.....	40
3.6	Matematická simulace procesu DRECE.....	42
3.6.1	Vlastní simulace (program Simufact.forming)	42
3.7	Vlastní experiment proveden na zařízení DRECE	46
3.7.1	Použité materiály pro experiment při procesu DRECE	47
3.7.2	Mazivo GLEIT - $\mu^{\text{®}}$ HP 515.....	47
3.7.3	Výsledky experimentů dosažených na zařízení DRECE	48
3.8	Porovnání matematické simulace s experimentem	53
4	METALOGRAFICKÁ ANALÝZA.....	55
4.1	Vliv počtu průchodů na velikost zrna Al99,5	55
4.2	Vliv počtu průchodů na velikost zrna Cu99,5	56
5	ANALÝZA DOSAŽENÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PROCESEM DRECE	60
5.1	Analýza dosažených mechanických vlastností u Al99,5	61
5.2	Analýza dosažených mechanických vlastností u Cu99,5	61
6	CELKOVÉ VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	62
6.1	Vyhodnocení dosažených hodnot intenzity deformace a napětí při matematické simulaci procesu DRECE	62
6.2	Vyhodnocení mechanických vlastností na experimentu Al99,5 a Cu99,5.....	63
6.2.1	Naměřené tvrdosti na Al99,5	63
6.2.2	Tahové zkoušky provedené na Al99,5	64
6.2.3	Naměřené tvrdosti na Cu99,5.....	64
6.2.4	Tahové zkoušky provedené na Cu99,5	66

ZÁVĚR	67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TOUTO PRACÍ	71
Seznam příloh	71

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
A	Tažnost	[%]
a_0/a_u	Tloušťka zkušební tyče před zkouškou/po přetržení	[mm]
b	Šířka kanálu	[mm]
b_0/b_u	Šířka zkušební tyče před zkouškou/po přetržení	[mm]
C	Koeficient pevnosti	[MPa]
D	Průměr kola	[mm]
F	Síla	[N]
$F_{p0,2}$	Zatížení na mezi kluzu	[N]
F_n	Zatížení na mezi pevnosti	[N]
f	Součinitel tření	[-]
H_0	Výška kanálu po protlačení	[mm]
H_1	Počáteční výška kanálu	[mm]
l_0/l_u	Měřená délka zkušební tyče před zkouškou/po přetržení	[mm]
m	Třecí faktor	[-]
n	Exponent zpevnění	[-]
p_{max}	Tlak na nástroj	[MPa]
q	Parametr atomové hustoty	[-]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
R_n	Mez pevnosti	[MPa]
R_1	Vnitřní rádius nástroje	[mm]
R_2	Vnější rádius nástroje	[mm]
S_0/S_u	Poměr příčného průřezu zkušební tyče před zkouškou a po přetržení	[mm ²]
$T_{nástroj}$	Teplota nástroje	[°C]
T_{pol}	Teplota polotovaru	[°C]
T_o	Teplota okolí	[°C]
v	Rychlost hnacího kola	[m · s ⁻¹]
V	Objem	[mm ³]
x	Aritmetický průměr hodnot	[mm]
Z	Kontrakce	[%]

$\bar{\varepsilon}$	Efektivní deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}$	Intenzita rychlosti deformace	[s ⁻¹]
ε_i	Intenzita deformace	[-]
ε_v	Rychlost objemového přetvoření	[-]
\varnothing	Úhel přechodu dvou kanálů	[°]
ψ	Úhel zaoblení přechodu dvou kanálů	[°]
$\bar{\sigma}$	Střední napětí	[MPa]
σ_i	Intenzita napětí	[MPa]
σ_m	Hydrostatické napětí	[MPa]

Seznam použitých zkratk

CCSS/C2S2	Kontinuální uzavřené protlačování pásu plechu (Continuous Confined Strip Shearing)
CDZ	CONFORM deformační zóna
CONFORM	Kontinuální protlačování nástrojem (Continuous Extrusion Forming)
DRECE	Protlačování plechu přes kanál pomocí válců (Dual Rolling Equal Channel Extrusion)
ECAP	Protlačování rovnostranným pravouhlým kanálem (Equal Channel Angular Pressing)
EDZ	ECAP deformační zóna
FEA	Metoda konečných prvků (Finite Element Analysis)
FEM	Metoda konečných elementů (Finite Element Method)
FVM	Metoda konečných objemů (Finite Volume Method)
HDZ	Čelní deformační zóna
HV5	Tvrdost dle Vickerse (zatížení 5 kg)
MDZ	Hlavní deformační zóna
MKP	Metoda konečných prvků
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
SPD	Vícenásobná plastická deformace (Severe Plastic Deformation)
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
UKAEA	Ústav pro atomovou energii
UFG	Velmi jemnozrnné materiály (Ultra-Fine Grain)
XRD	Rentgenový difraktometr

ÚVOD

V poslední době je vývoj zaměřen na technologie, které vyžaduje trvale udržitelný lidský rozvoj lidské společnosti. Jsou to technologie, které zpracovávají materiály s ultrajemnou strukturou, kde je průměrná velikost zrna resp. disperzních částic menší než $1\ \mu\text{m}$ a materiály s nanokrystalickou strukturou neboli nanostrukturní materiály s průměrnou velikostí zrna, která je výrazně menší než $100\ \text{nm}$. Tyto materiály mají velmi vysoké mechanické vlastnosti jako je vyšší pevnost, odolnost proti únavě a dobrou tvářitelnost. Typickým charakteristickým rysem nanokrystalických materiálů je závislost meze kluzu na velikosti zrna. Technologie výroby dostatečně objemově masivních vzorků materiálu jsou založeny na tzv. extrémní plastické deformaci SPD (severe plastic deformation), která vede k vytvoření ultrajemných zrn.

Technologie výroby patří v současnosti k předním oblastem výzkumu materiálů a tvářecích technologií na celém světě. Nanomateriály v sobě nesou potenciál být nejslibnější a nejpokrokovější technologií tohoto století. Nabízí nepřehlednou škálu možností využití a také ekonomický přínos.

V celosvětové honbě za pokrokem dochází k ohromnému vzestupu technologií výroby velmi jemnozrnných materiálů (UFG), který je v současné době velmi intenzivně urychlován. Nejznámější a nejvyužívanější metoda SPD je ECAP (Equal Channel Angular Pressing). Je to důležitá metoda pro získání kovových materiálů s neobvyklými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Jako další se vyvíjí možnost pro tváření technologie CONFORM (Continuous Extrusion Forming).

Technologie CONFORM je kontinuální tvářecí proces protlačování vyvinutý v roce 1971. Zařízení se skládá z rotačních válců s drážkou, patky usměrňující polotovary do drážky a dotyk, který zastavuje materiál a nástroj. Proces je rozšířený v efektivní výrobě hliníkových slitin (týče, trubky, profily) i měděných drátů a profilů. Materiál je ve stavu vysokého plastického toku kvůli změně smykového směru na podpěře a díky vysoké teplotě. Protlačovaný materiál je zcela rekrystalizovaný, je ve tvrzeném stavu. Protlačení je plynulé bez zastavení stroje. Kusy materiálu se dají spojit dohromady, tudíž se dají vyrobit velké svitky vyrobených produktů. Vysoký protlačovací poměr a nízké výrobní náklady dávají výhody pro jeho použití ve velkých průmyslových oborech jako je automobilový a kosmický průmysl.

Ve vývoji je také podobný typ zařízení pro plošné tváření nazvaný DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion). Zařízení je v současné době vyvíjeno na pracovišti Vývoje nových technologií, Fakulty strojní VŠB – TU Ostrava ve spolupráci s VÚHŽ Dobrá a.s.

V současné době, lze docílit nejvyššího zefektivnění průmyslové výroby využíváním nových technologií a plného zapojení počítačové podpory technologie do praxe. V posledním období zaznamenal největší „boom“ rozvoj softwaru s počítačovou simulací a využitím MKP. Promyšleným využitím počítačové simulace je dosahováno výrazných finančních úspor.

1 SOUČASNÉ POZNATKY Z OBLASTI SPD ZAMĚŘENÉ NA PROCES CONFORM

1.1 Využití technologie CONFORM k protlačování profilů z Cu

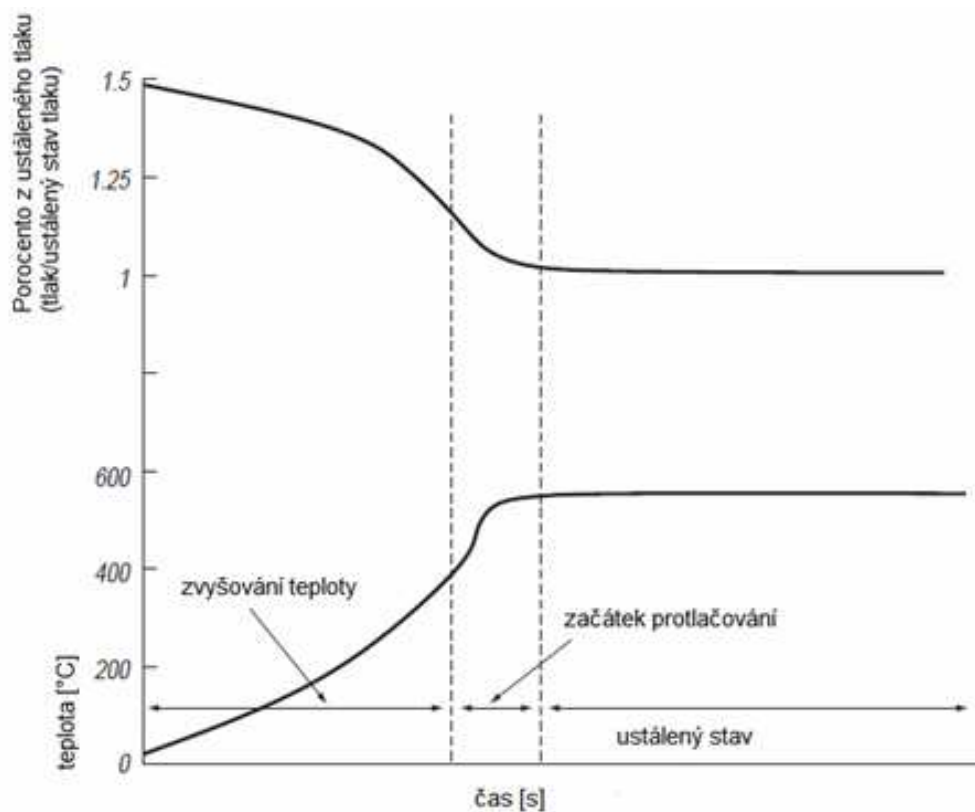
Existují různé formy protlačování mědi, pro které je významné získání bližších čistých tvarů z hlediska snížení nákladů a počtu operací. Proces CONFORM je založen na kontinuálním protlačování rotačních i nerotačních profilů a pásu plechů. V článku byla analyzována dosažená velikost protlačovací síly, tok kovu a výskyt vnitřních vad v polotovaru z mědi nepravidelného průřezu. V důsledku toho, že při vlastním procesu došlo k výraznému snížení počtu průchodů nástrojem pro dosažení předpokládaného zjemnění zrna, dosáhlo se tímto podstatného zefektivnění výrobního procesu. V článku je uvedena nová technologie pro protlačování nepravidelného průřezu polotovarů z mědi a příklady výrobků, na které lze danou technologii aplikovat. [1]

1.1.1 Profily z Cu vytvořeny protlačovací technologií

Vzorky profilů z mědi (obr. č. 1.3) vyrobené konvenčními procesy jsou vytvořeny opakovaným tažením, dvakrát žíháním nebo vícekrát přímým protlačováním. V procesu CONFORM jsou vytvořeny téměř čisté tvary, dochází ke zpevnění materiálu, zrovnoměnění toku materiálu a tím k zamezení vnitřních vad ve tvářeném materiálu. [1]

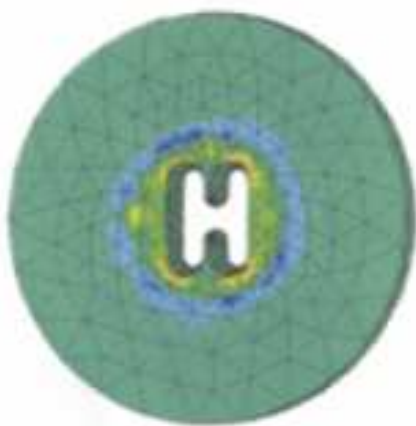
1.1.2 Analýza silových parametrů

Obr. č. 1.1 ukazuje závislost změny teploty v procesu protlačování a změny protlačovacího tlaku na začátku CONFORM protlačování. U přímého protlačování jsou nástroje a polotovary přehřívány. V CONFORM protlačování třecí teplo a tepelné úpravy materiálu způsobují, že protlačovací nástroj je vystaven vysokému namáhání v širokém rozsahu teplot. Pevnost materiálu nástroje musí být vyvážená pro teplou i studenou teplotu. Vhodná volba materiálu nástroje je důležitá zejména při protlačování profilů, kdy se projevuje koncentrace napětí. Napětí se analyzuje pomocí metody konečných prvků, která je použita k návrhu napěťových-odolných materiálů, jehož vzor je uveden v obr. č. 1.2. [1]



Obr. č. 1.1 Změna teploty nástroje a tlaku při protlačování na začátku protlačování.

Při protlačování nástrojem, protlačovací tlaky mají velký teplotní rozsah. [1]



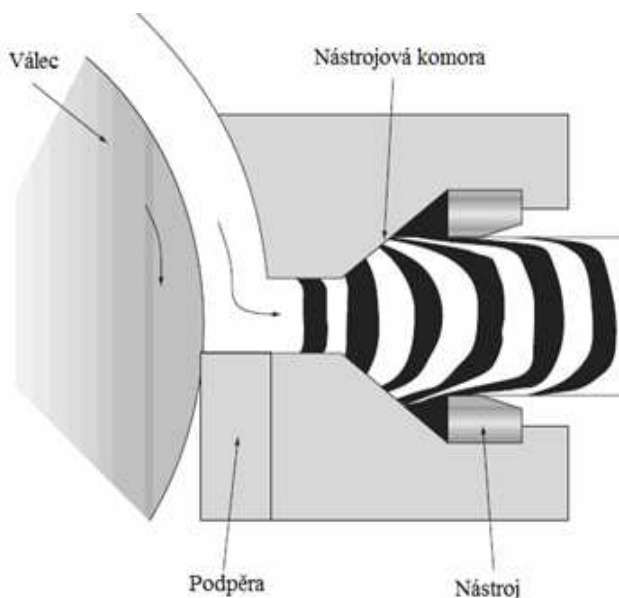
Obr. č. 1.2 Příklad pevnostní analýzy nástroje.
Je možné navrhnout nástroj, který snižuje napětí. [1]



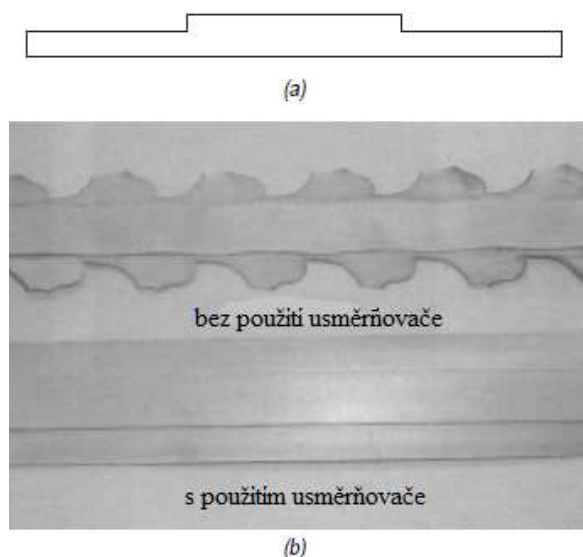
Obr. č. 1.3 Polotovary
nepravidelného průřezu z mědi [1]

1.1.3 Simulace toku materiálu

Dodaný materiál pro CONFORM protlačování má průměr 10-20 mm a šířka je 40 mm a větší. Obr. č. 1.4 ukazuje simulaci tečení kovu v nástrojové komoře pomocí černé a bílé plastelíny. Přestože nástrojová komora je kuželového tvaru a materiál teče snadněji, tok je slabší. Tok materiálu se soustředí do širší části. To znamená, že se projevuje nedostatek materiálu pro zajištění toku do užší části. Z tohoto důvodu se vyskytují trhliny v tence zobrazené části polotovaru – ztenčené a rozšířené oblasti, jak je znázorněno na obr. č. 1.5 (a). Obr. č. 1.5 (b) ukazuje příklad zlepšení toku – jeho usměrněním. Vytlačovaný materiál má šířku 50 mm, zatímco dodaný materiál má průměr 12 mm. Usměrněný tok měl tloušťku 6 mm. Žádné viditelné trhliny nevznikly protlačováním s usměrněním toku. Usměrňovač toku může přinutit rozšiřující příčnou část plochy zhruba třikrát vyšší než dodaný materiál nebo rozšiřuje šířku asi čtyřikrát použitého průměru materiálu. [1]



Obr. č. 1.4 Simulace proudění kovu
Střed toku je silný, kde je hrana, tok je slabý. [1]



Obr. č. 1.5 Zlepšení toku kovu přidáním
usměrňovače toku [1]

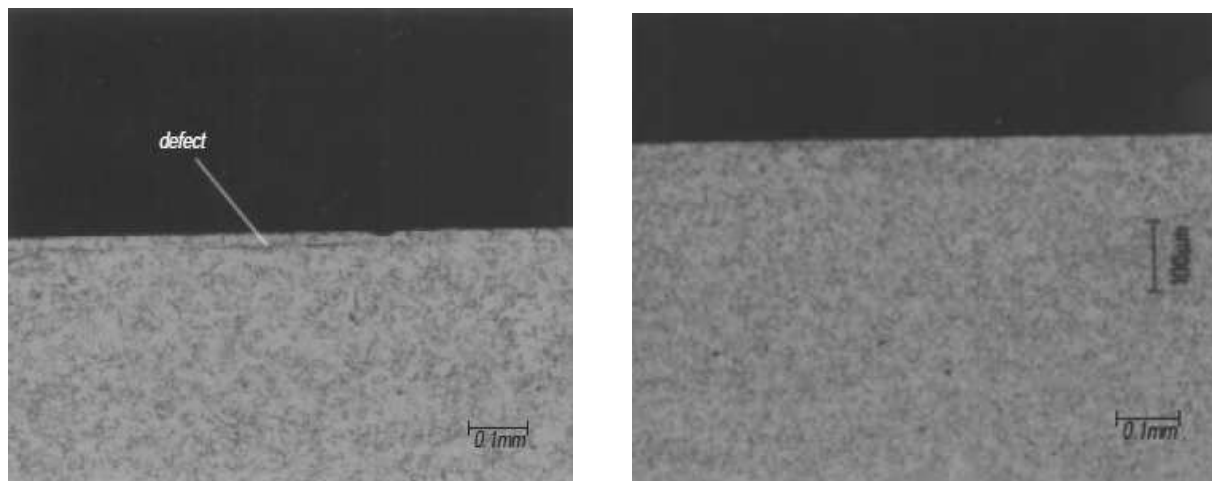
1.1.4 Zamezení vzniku vnitřních vad

Při CONFORM protlačování materiálový povrch polotovaru je znečištěný, vzduch může vnikat do tvářeného polotovaru. Vznikají oxidy mědi, které mohou zapříčinit vznik vnitřních vad, jako jsou vyvýšeniny. Obr. č. 1.6 (a) ukazuje příklad vnitřní vady.

Proces CONFORM umožňuje dosažení vysokého přetvoření materiálu, který umožňuje jeho aplikaci při výrobě například měděných chladičů, tyčí komutátorů používané

v elektrickém motoru a potrubních dílů. Dobré výsledky byly získány s ohledem na snížení složitosti procesů a dosažení požadovaných výsledných vlastností finálních produktů.

CONFORM technologie přispívá nejen ke snížení nákladů snížením počtu dílčích operací, ale rovněž umožňuje vyrábět téměř čisté tvary. Rovněž umožňuje výrobu složitých forem, jako jsou chladiče bez nutnosti obrábění. [1]



(a) včetně vnitřních vad

(b) bez vnitřních vad

Obr. č. 1.6 Průřez mikrostruktury před a po procesu CONFORM [1]

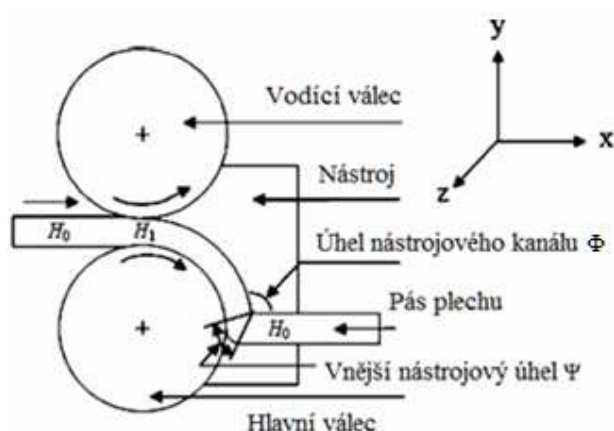
1.2 Numerická analýza chování Al při procesu (CCSS/C2S2) ve 3D

Nové tvářecí procesy jako CCSS/C2S2 (kontinuální uzavřené protlačování pásu plechu) je proces založený na plasticko-deformačních metodách ECAP a CONFORM procesu. ECAP je vícenásobné plastické tváření, kde se hromadí vysoké celkové efektivní deformace při více průchodech. Proces ECAP nemůže zvládnout zpracování dlouhého tenkého plechu. Proto byla navržena nové technologie C2S2 proces, který dokáže ovlivnit smykové deformace na dlouhém a zároveň tenkém kovovém plechu. Nekonečné délky UFG plechů kovu lze získat použitím C2S2 procesu. Deformační chování materiálu při protlačování je podobné, jako u běžných protlačovacích procesů. Schematický princip procesu C2S2 je zobrazen na obr. č. 1.7, kde Φ je úhel nástrojového kanálu a úhel Ψ je vnější nástrojový úhel. Důležitou okolností při procesu C2S2 je vyšetřování (3D) deformačního chování materiálu.

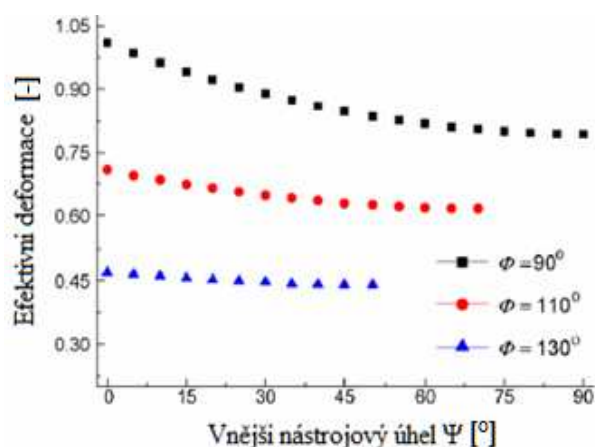
Proces C2S2 byl numericky simulován pomocí programu DEFORM 3D a bylo zkoumáno deformační chování čistého hliníkového plechu při protlačování. Jsou zde také uvedeny vlivy geometrických parametrů nástroje, jako jsou úhly Ψ a Φ . Vliv tření mezi nástrojem a polotovarem je nejdůležitějším faktorem pro efektivní změnu deformace při procesu C2S2. [2]

1.2.1 Princip C2S2 procesu

C2S2 je proces protlačování tenkých plechů ze slitiny hliníku. Podávací válec a přítlačný válec jsou použity jako podavače plechu. Dva kanály se stejnou šířkou se protínají pod úhlem Φ tzv. nástrojový úhel kanálu, který se obvykle pohybuje v rozmezí od 90° do 150° . Další úhel Ψ definuje oblouk zaoblení na vnějším místě nástrojového úhlu a nazývá se vnější nástrojový úhel, který se pohybuje od 0° do $(180^\circ - \Phi)$. Posuvová rychlost je závislá na rozměrech plechu a nástrojovém úhlu kanálu. Obvyklá rychlost je 5 až 50 m/min. Rozměr nástrojového kanálu a výstupního kanálu je větší než u vstupního kanálu. [2]



Obr. č. 1.7 Schéma C2S2 procesu [2]



Obr. č. 1.8 Vývoj efektivní deformace [2]

Obr. č. 1.8 ukazuje vývoj efektivní deformace se stejným vnějším nástrojovým úhlem Ψ a rozdílnými nástrojovými úhly kanálu Φ , kde $H_1 = 1,45$ mm a $H_0 = 1,55$ mm. Je zřejmé, že efektivní deformace v plechu se snižuje se zvyšováním úhlu kanálu nástroje Φ při konstantním vnějším nástrojovém úhlu Ψ . Nástrojový úhel kanálu Φ má větší vliv na efektivní deformaci v plechu, než úhel Ψ . [2]

1.2.2 Numerická simulace procesu C2S2

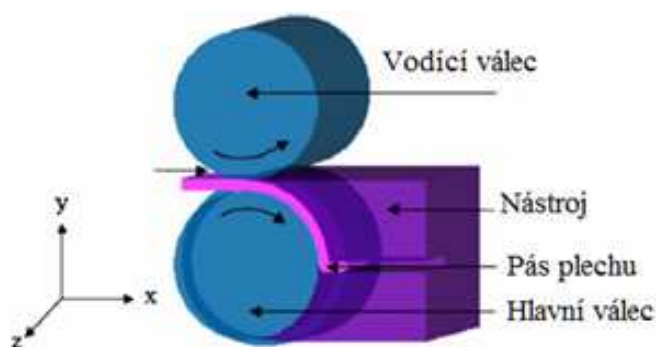
Model konečných prvků

Simulace procesu C2S2 byla provedena pomocí metody konečných prvků v programu DEFORM 3D. Model konečných prvků u procesu C2S2 je znázorněn na obr. č. 1.9. Rozměry

plechu jsou $1,55 \times 10 \times 80$ mm. Materiál je čistý hliník Al 99,99%. Plech je předpokládán jako tuho plastická hmota, která mezi tokem napětí a efektivní deformací používá vztah:

$$\bar{\sigma} = C \bar{\varepsilon}^n \quad (1.1)$$

Jedná se o tvářecí proces za studena (20°C), kde $\bar{\sigma}$ je efektivní napětí, $\bar{\varepsilon}$ je efektivní deformace, konstanta pevnosti $C = 170$ MPa a exponent zpevnění $n = 0,2$. Deformující těleso je rozděleno do 5625 uzlů a 22236 prvků. Posunová rychlost je 20 mm/s a časový skok je 0,1 s. Třecí faktor $m = 0,7$ pro posuvný válec a pro nástrojový kanál je tření faktor $m = 0,2$. Tři nástrojové kanálové úhly $\Phi = (90^\circ, 105^\circ \text{ a } 120^\circ)$ a tři vnější nástrojové úhly $\Psi = (0^\circ, 45^\circ \text{ a } 90^\circ)$ jsou uvedené v numerické simulaci. [2]



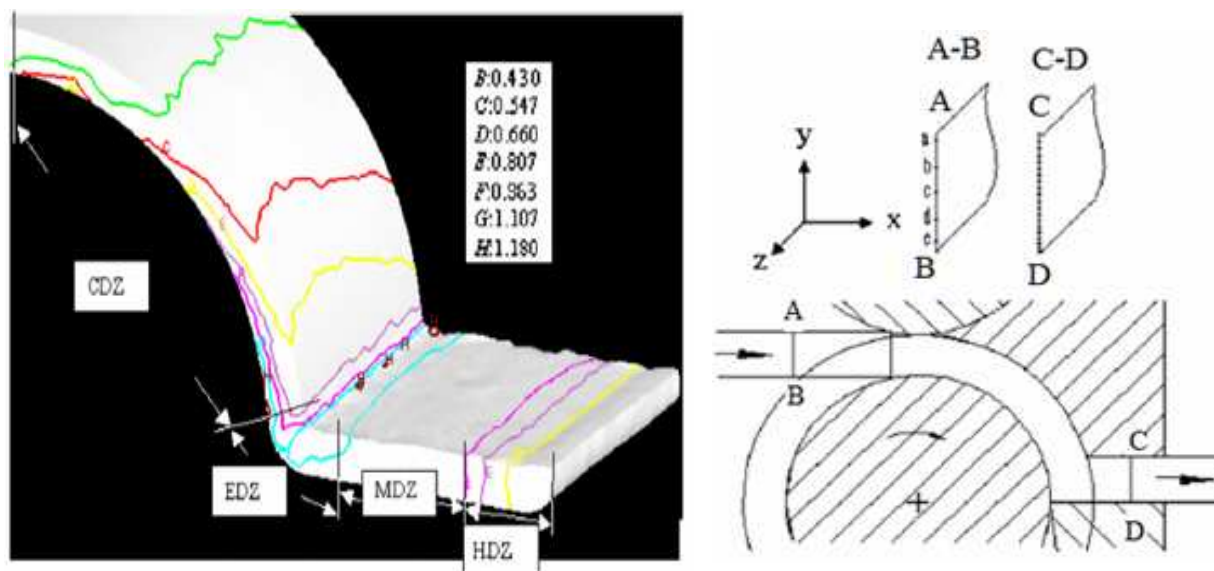
Obr. č.1.9 Model konečných prvků pro simulaci C2S2 procesu [2]

Deformační rozložení C2S2 procesu

Obr. č. 1.10 (a) ukazuje efektivní deformační rozložení deformovaného pásu při $\Phi = 90^\circ$. Zpracovaný pás lze rozdělit do čtyř hlavních zón: čelní deformovaná zóna (HDZ), hlavní zóna (MDZ), ECAP zóna (EDZ) a CONFORM zóna (CDZ). Zóna HDZ má nejednotné efektivní deformační rozložení. Efektivní deformační rozložení MDZ je jednotné po směru šířky plechu. EDZ je těžká deformace oblasti, na průniku dvou kanálů. Efektivní deformace na plechu je poměrně velká. Zóna CDZ je poháněna třením mezi podávacím a hlavním válcem.

Deformace plechu při zpracovávání v procesu C2S2 je nezávislá na šířce plechu ve směru osy Z. Deformace v ose XY je konstantní po celém plechu. Konečné výsledky analýzy prvků jsou zaměřeny na vývoj deformace plechu v části XY. Oddíl A-B nedeformované oblasti a C-D oddílu deformované oblasti jsou příslušně vybrány jako kontrolní body pro měření efektivní deformace, jak je znázorněno na obr. č. 1.10 (b). Pět bodů na části A-B (tloušťka plechu), jsou považovány za body sledující změny efektivní deformace v C2S2 procesu. 20 bodů na C-D linii (tloušťka plechu) slouží k měření a k získání informací o deformaci v plechu. [2]

Obr. č. 1.11 zobrazuje efektivní deformaci vývojové křivky pěti bodů na linii A-B a efektivní rozložení deformace podél linie C-D deformovaného plechu. Křivky efektivní deformace jsou na obr. č. 1.11 (a) a jsou rozděleny do tří různých skupin deformace s časem: CONFORM fáze, ECAP fáze a deformovaná fáze. Když deformační doba je $0 \div 3$ s, deformace patří ke CONFORM fázi, která se v plechu zvyšuje.



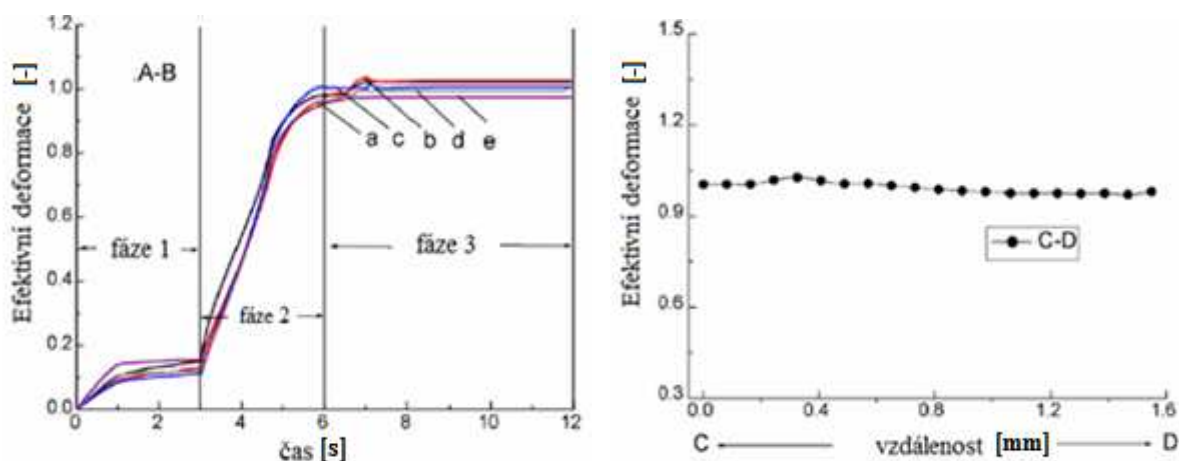
(a) efektivní deformace v plechu

(b) část A-B nedeformované oblasti a C-D deformovaná oblast

Obr. č. 1.10 Efektivní deformace v plechu při $\Phi = 90^\circ$ [2]

Když je deformační doba mezi $3 \div 5$ s, deformace patří k deformaci ECAP fáze, v níž se efektivní deformace v plechu rychle zvyšuje. Je-li materiál protlačován nástrojovým úhlem kanálu, deformace v plechu dosáhne ustáleného stavu. Je také patrné, že křivky v pěti bodech na linii A-B jsou mírně odlišné. Od shora po spodní části linie A-B, odpovídají body *a-e*, efektivní deformace mírně klesá. Účinná deformace bodu *a* je největší s hodnotou 1,02. Efektivní deformace bodu *e* je nejmenší s hodnotou 0,97.

Obr. č. 1.11 (b) ukazuje efektivní deformaci podél tloušťky listu C-D linie. Křivky jsou získány efektivní deformací hodnoty 20 bodů na C-D linii. Efektivní deformace se postupně snižuje od C až k bodu D. Ale účinný tlak se mírně zvyšuje opět u bodu D, který zobrazuje spodní plochu sekce. [2]



(a) Efektivní deformace pěti bodů na B-linii

(b) Efektivní deformace C-D linie

Obr. č. 1.11 Křivky efektivní deformace ($\Phi = 90^\circ\text{C}$) [2]

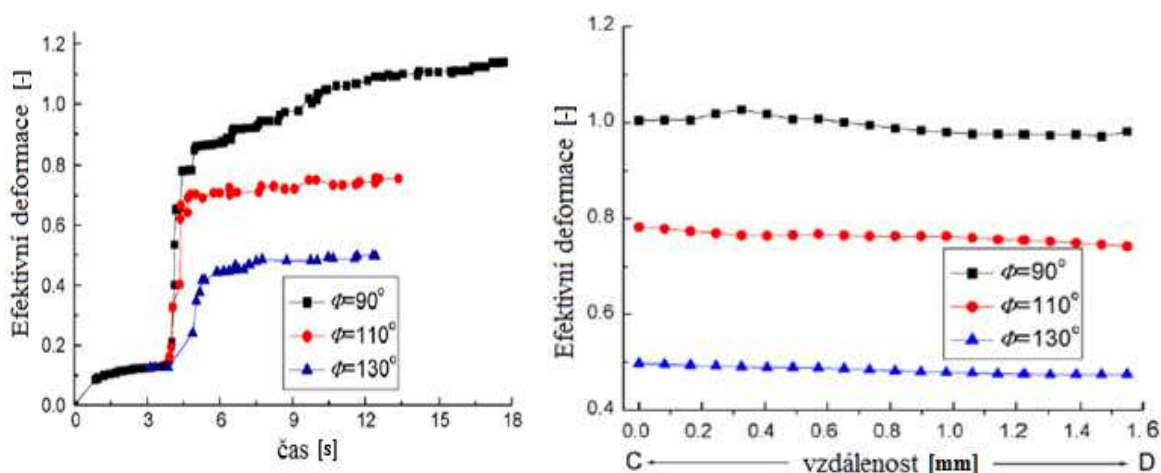
1.2.3 Geometrická analýza nástroje

Geometrie nástroje má zásadní vliv na deformaci plechu. Simulace s využitím metody konečných prvků má za cíl optimalizovat tvary nástroje a účinky různých úhlů nástroje Φ a Ψ k dosažení vyšší deformace plechu. [2]

Účinek úhlu kanálu nástroje

Bod A-B ve středu plechu je zobrazen na obr. č. 1.10 (b) a je vybrán jako sledovací bod. Obr. č. 1.12 (a) popisuje vztah křivek efektivní deformace sledovaného bodu s nástrojovým úhlem kanálu Φ , kde $\Psi = 0^\circ$. V počáteční fázi válcování se efektivní deformace pro jiný úhel Φ kanálu nástroje mírně zvyšuje. Ale když je plech v EDZ, efektivní deformace v plechu výrazně vzroste. S růstem nástrojových úhlů kanálů se efektivní deformace v plechu rychle zvyšuje. Když je plech vyjetý z EDZ, efektivní deformace pro všechny případy nástrojových úhlů kanálů stoupá pomalu. Z uvedené analýzy je vidět, že nástrojový úhel kanálu je důležitý parametr ovlivňující efektivní deformaci pásu plechu.

Obr. č. 1.12 (b) ukazuje efektivní deformaci podél tloušťky plechu C-D linie pro různé úhly kanálu nástroje Φ s pevným $\Psi = 0^\circ$. Efektivní deformace na různých úhlech kanálu nástroje má velký rozdíl. Když nástrojový úhel kanálu Φ je roven 90° , efektivní deformace v plechu dosahuje hodnoty 0,975. Při $\Phi = 130^\circ$ efektivní deformace má hodnotu 0,5. Úhel nástroje kanálu je neaktivnější parametr pro efektivní deformaci v plechu. [2]



(a) Vztah křivek efektivní deformace definovaného bodu s úhlem Φ

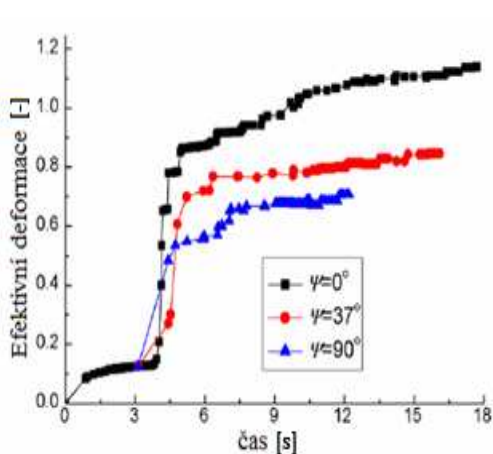
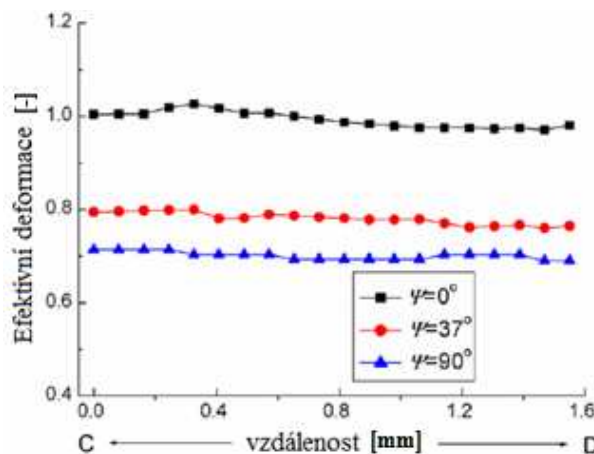
(b) Rozložení deformace podél tloušťky plechu C-D pro různé úhly Φ

Obr. č. 1.12 Křivky efektivní deformace ($\Psi = 0^\circ$) [2]

Účinek vnějšího zaoblení úhlu nástroje

Obr. č. 1.13 (a) představuje vztah křivky efektivní deformace sledovaného bodu nástroje s vnějším úhlem zaoblení Ψ , kde nástrojový kanálový úhel $\Phi = 90^\circ$. Křivka změny se také skládá ze tří etap. V počáteční fázi válcování nám efektivní deformace pro různé nástrojové úhly mírně vzroste. V zóně EDZ deformace v listu výrazně vzroste a je rozdíl mezi efektivní deformací pro různé nástrojové úhly kanálu. V zóně EDZ efektivní deformace pro všechny případy úhlu stoupá pomalu. Vnější zaoblení nástrojového úhlu je významným parametrem ovlivňující deformaci.

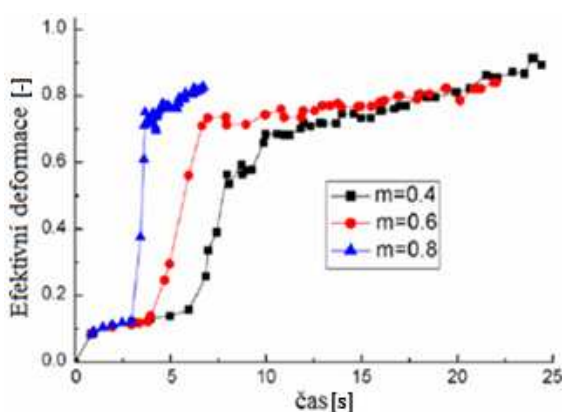
Obr. č. 1.13 (b) ukazuje deformaci v podélné tloušťce plechu C-D pro různé úhly Ψ a $\Phi = 90^\circ$. Úhel $\Psi = 0^\circ$ deformace plechu má hodnotu 0,975. Když $\Psi = 37^\circ$ deformace nabývá maximální hodnoty 0,79. Při velikosti úhlu $\Psi = 90^\circ$ je deformace 0,70. Deformace při $\Psi = 0^\circ$ se zvyšuje rychleji než u $\Psi = 37^\circ$ a 90° . [2]

(a) Efektivní deformace s úhlem Ψ (b) deformace podél plechu v C-D linii pro různé Ψ úhlyObr. č. 1.13 Efektivní deformace pro $\Phi = 90^\circ$ [2]

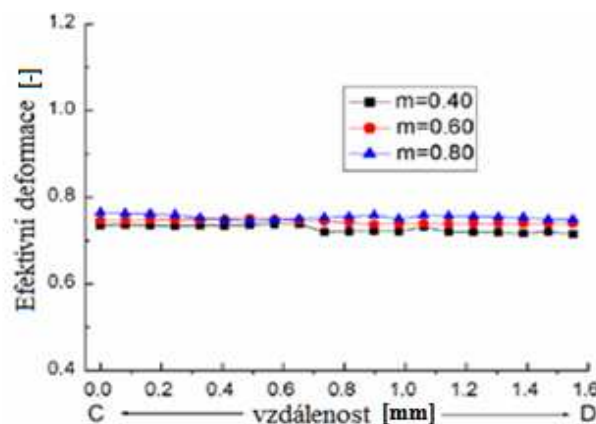
1.2.4 Účinek tření

Tření mezi plechem a válcem má také vliv na deformaci. Obr. č. 1.14 (a) ukazuje křivky deformace v závislosti na čase a tření pro různé podmínky, kdy $\Phi = 90^\circ$ a $\Psi = 0^\circ$. Střední bod tloušťky plechu A-B je použit jako místo pro sledování efektivní deformace. Je prokázáno, že koeficient tření způsobuje zvýšení stupně času válcování. Při třecím faktoru $m = 0,8$ postupový čas je kolem 6,5 s. Při třecím faktoru $m = 0,4$ je čas 24 s.

Obr. č. 1.14 (b) poskytuje deformační rozdělení v rámci plechu v C-D linii při různých podmínkách tření. Když $m = 0,4$ efektivní deformace v plechu má hodnotu 0,733. Když $m = 0,6$ deformace je 0,743. Při $m = 0,8$ je 0,765. Vyšší hodnotu deformace lze získat v plechu, když $m = 0,6$ a $0,8$. Vliv tření na jednotnost deformace lze zanedbat. [2]



(a) Deformace procesu při různých podmínkách tření



(b) Deformace plechu v C-D linii při různých podmínkách tření

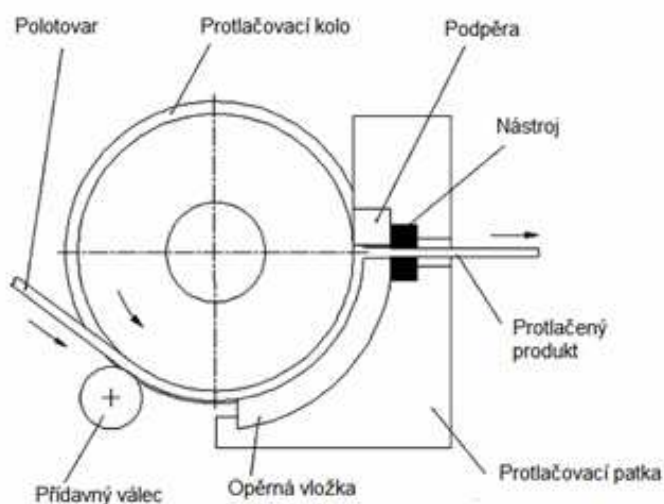
Obr. č. 1. 14 Efektivní deformace při $\Phi = 90^\circ$, $\Psi = 0^\circ$ [2]

1.3 Mikrostruktury a tahové vlastnosti hořčíkové slitiny AZ31 tvářené procesem CONFORM

AZ31 hořčíková slitina je protlačena na modifikovaném protlačovacím stroji. Mikrostruktury a tahové vlastnosti z protlačené slitiny procesem CONFORM jsou ve srovnání s konvenčním přímým protlačováním. [3]

1.3.1 Materiály a experimentální postupy

Experimenty byly provedeny na hořčíkové slitině AZ31 s chemickým složením 3.2% Al, 0,8% Zn a Mn má 0.4%. Pro CONFORM proces byly vzorky slitiny s průměrem 10 mm a délkou 400 mm. Byly obrobeny z odlitku ingotu a jejich povrchy byly čištěny chemicky a byly průběžně protlačeny na tyče do 8 mm v poměru s protlačovacím poměrem 1.56:1 a přizpůsobeny na LJ300 kontinuální protlačovací stroj. Rychlost kola byla 8 ot/min a teplota drážky byla 350 °C. Schéma procesu CONFORM je zobrazeno na obr. č. 1.15. Vzorky s délkou 25 mm a průměrem 5 mm byly podávány paralelně do protlačovacího směru. Jednoosé tahové zkoušky byly provedeny na stroji WDWE200 při konstantním posunu 0,5 mm/min. Extrudované mikrostruktury kolmé k protlačovacímu směru byly přezkoumány na MM-6 optickém mikroskopu po mechanickém leštění a leptání při 20°C. Lomové plochy napětí vzorků byly zkoumány na JEM-6700F rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM). Distribuce na krystalografických směrech byla určena na D5000 rentgenovém difraktometru (XRD). [3]



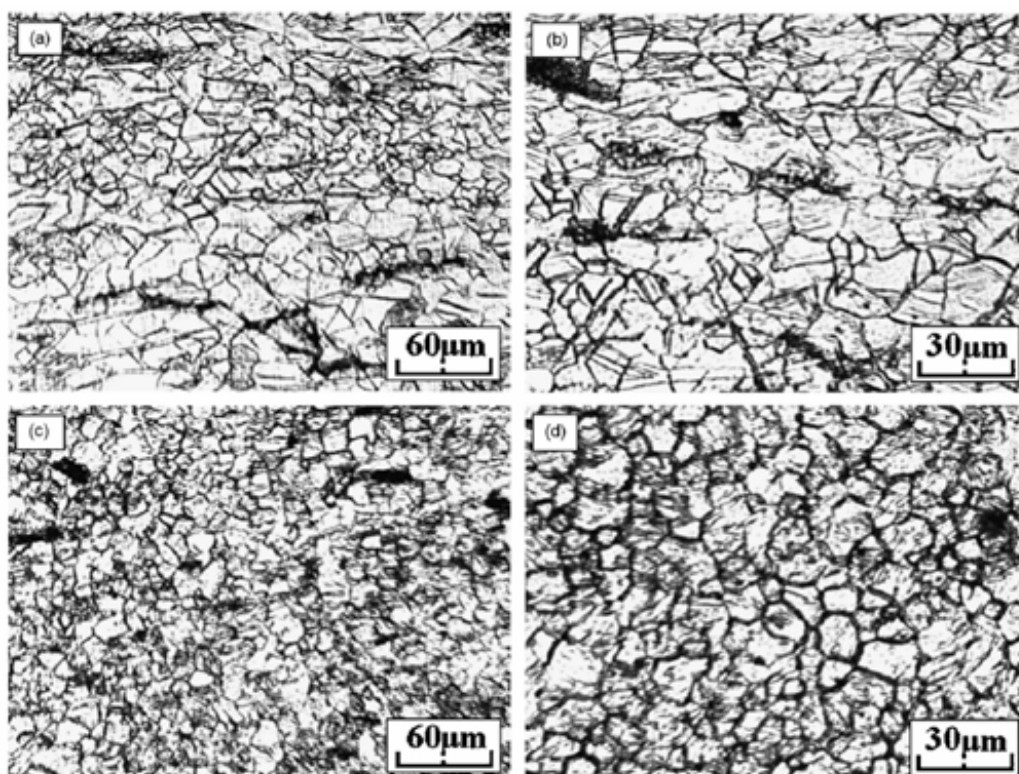
Obr. č. 1.15 Schéma deformace při CONFORM procesu [3]

1.3.2 Výsledky

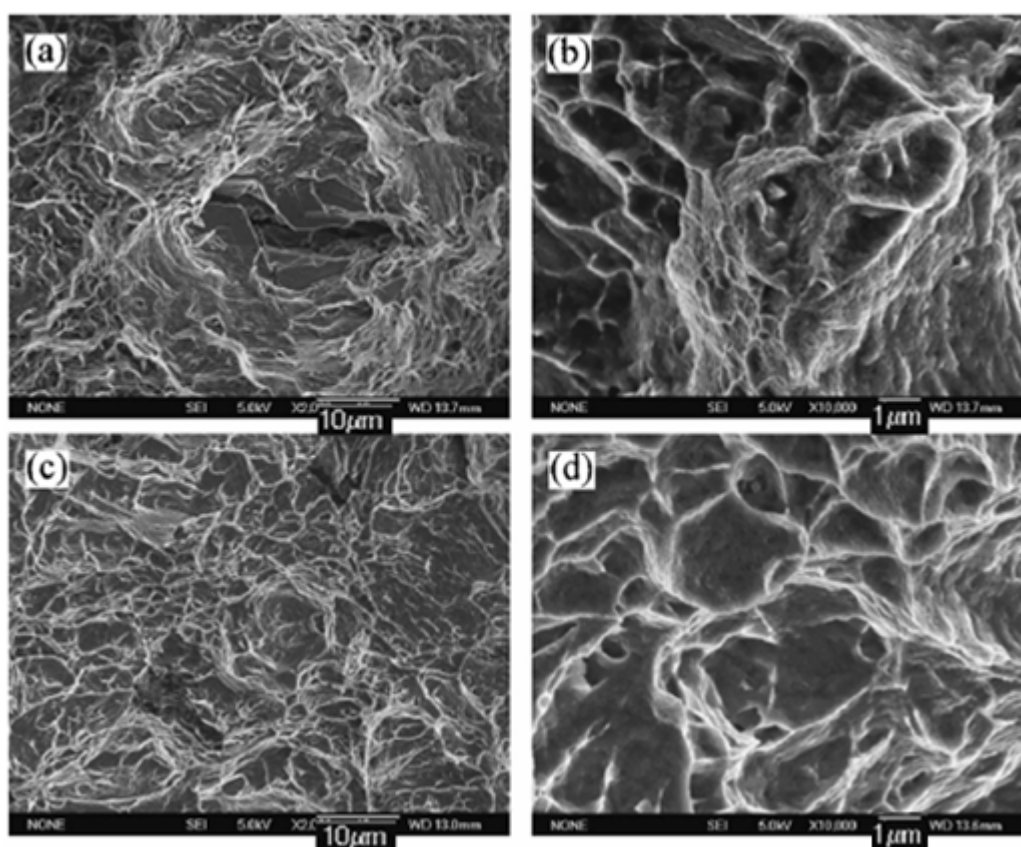
Mikrostruktury z protlačené slitiny hořčíku AZ31 jsou zobrazené na obr. č. 1.16. Můžeme vidět, že více homogenně distribuovaná a homogenně zrnitá struktura existuje při protlačování hořčíkové slitiny procesem CONFORM, porovnáním s konvenčním přímým protlačováním. I když vzorky z těchto dvou procesů tvořili podobný řez na výstupu nástroje při teplotě asi 380°C a je také zřejmé, že lisovací poměr CONFORM procesu (1.56:1) je nižší než u běžného přímého protlačování (21:1). To je pravděpodobně spojeno s deformací a teplotou kovu v průběhu procesu CONFORM.

Je třeba si uvědomit, že tahové napětí při protlačování hořčíkové slitiny AZ31 připravené CONFORM procesem je nižší než u konvenčního přímého protlačování navzdory jemně-zrnité struktury (obr. č. 1.16).

Obr. č. 1.17 ukazuje SEM mikrografie lomové plochy napětí vzorků. Všechny lomy na površích jsou pokryty s populací lomových dolíčků, spolu s rozdílem velikostí a tvarů, které naznačují, že neplatné nukleace růstu a srůstání jsou mikromechanismem selhání. U konvenčně přímého protlačování hořčíkové slitiny AZ31, mělké důlky a praskliny jsou pozorovány u trhlin na povrchu v důsledku slabé tvárnosti. Pro CONFORM zpracované AZ31 slitin hořčíku jsou více homogenní a hlubší důlky jsou pozorovány na lomovém povrchu v důsledku s rostoucí houževnatostí. Změny lomové plochy jsou v souladu s celkovým prodloužením a naznačují, že lomové mechanismy CONFORMEM zpracovaným materiálem ve srovnání s konvenčně protlačenou slitinou, se změnil z křehkého typu lomu na tvárný typ, což vede k úplnému protržení důlků a jejich zarovnání. [3]



Obr. č. 1.16 Optické mikrostruktury protlačované hořčíkové slitiny AZ31 po: (a, b) konvenčním přímém protlačování, (c a d) po CONFORM procesu. [3]



Obr. č. 1.17 SEM mikrografie lomových ploch napětí u vzorků: (a, b) běžné přímé protlačení, (c a d) CONFORM proces [3]

CONFORM proces byl úspěšně použit na AZ31 hořčíkové slitině, která prokázala možnost efektivního kontinuálního tváření hořčíkových slitin. CONFORM procesem můžeme usměrnit zrna struktury, zlepšit stupně homogenity konstrukce a změnit orientaci bazální roviny a tím zvyšovat houževnatost, při mírném poklesu pevnosti v tahu. [3]

2 POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ K VYUŽITÍ MATEMATICKÉ SIMULACI SPD

Pro účely simulací a modelování technologických procesů plastické deformace se obecně naskytá řada možných systémů pracujících na FEA (Finite Element Analysis).

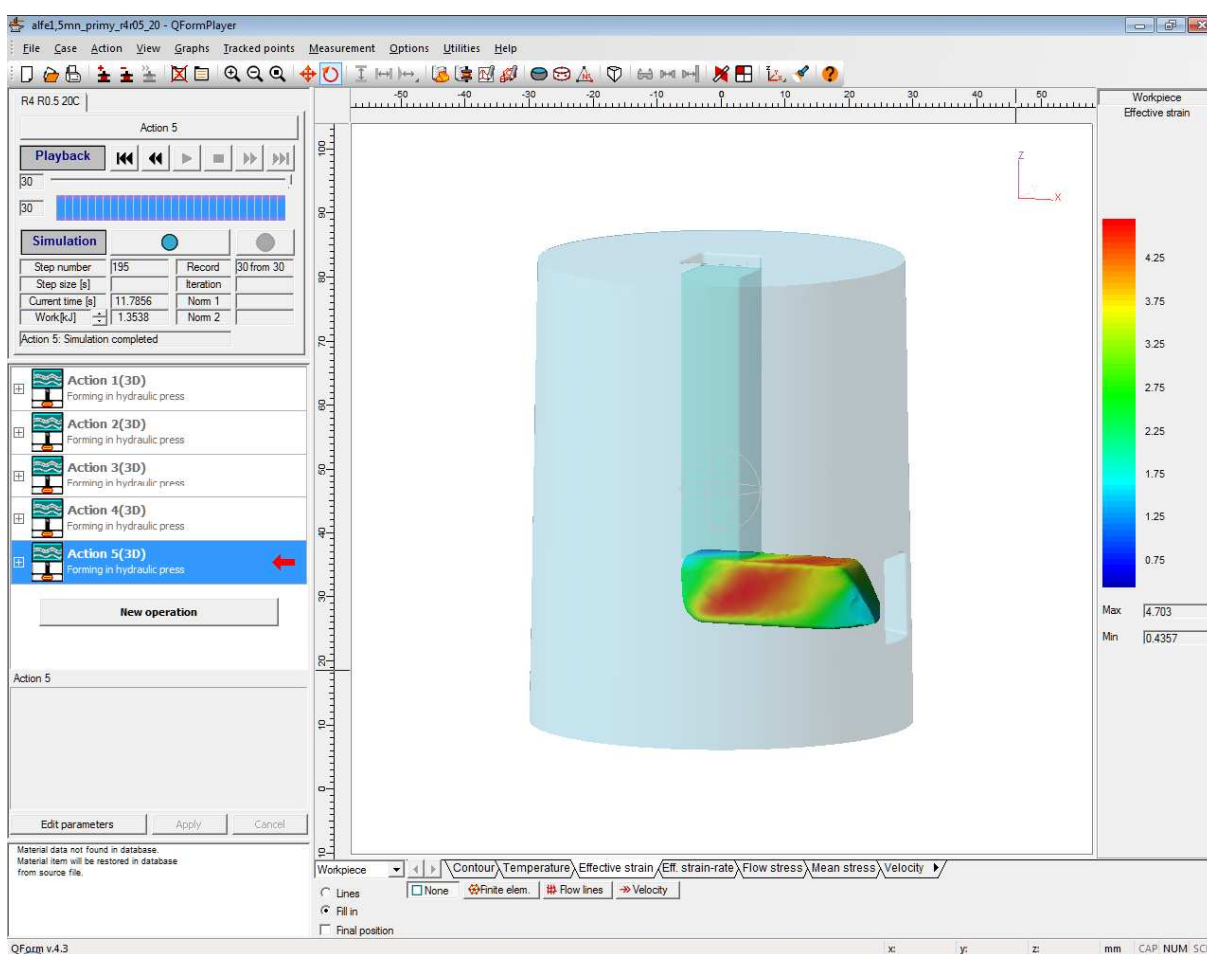
V následujícím výkladu budou popsány způsoby využití programů pro matematickou simulaci MKP dostupných na VŠB-Technické univerzity Ostrava na katedře mechanické technologie fakulty strojní (QForm, FormFEM, Simufact.forming). [4]

Matematická simulace řeší velmi složité technologické operace, které jsou neřešitelné nebo složitě řešitelné analytickými metodami. Simulace zkoumá chování tvářeného materiálu v reálném nebo zrychleném čase. Po provedení simulačního výpočtu lze odsimulovat průběh celé operace během chvíle. Pomocí simulace je možné důkladně prověřit různé varianty řešení. Umožňuje minimalizovat rizika chyb. [4]

2.1 Program QForm 3D

QForm (Quick Metal Forming Simulation) z firmy Quantor Ltd. Je určen pro simulaci a analýzu tvářecích procesů, objemového i plošného tváření jak za tepla, tak i za studena v 3D prostředí. Pracuje s tuho-plastickým modelem materiálu s možností použití elastických nástrojů. QForm je nástupcem simulačního programu FORM-2D. QForm je založen na propracovaných algoritmech metody konečných prvků MKP a FEM. Výsledky simulace jsou zobrazovány současně s postupem simulace. Uživatel má také možnost animovat výsledky simulace v režimu přehrávání. Během animace tvářecího procesu znázorňuje tok materiálu i tok vzniklých defektů. Během simulace je vidět teplota v každé části součásti a velikost deformace v materiálu a poskytuje informace o síle, energii a dalších důležitých parametrech procesu tváření. Výsledky simulace jsou zobrazeny prostřednictvím 3D grafiky. Model tváření kovů realizovaný v QForm odpovídá reálnému procesu tváření. QForm pomáhá návrháři vybrat polotovary, vyhodnotit kapacitu lisu, optimalizovat tvary předlisku a nástrojů, vybrat

vhodnou teplotu polotovaru, navrhnout odpovídající výronek, analyzovat vliv tření na materiál nástroje a zvolit správné mazivo, analyzovat napětí v nástroji atd. Tak je možné vyvíjet a testovat tvářecí technologie za pomoci počítače. QForm je účinný simulační nástroj, který přináší svým uživatelům mnoho výhod a úspor. Tento software lze použít pro simulaci protlačování, ražení, děrování a vystřihování, kalibrování, tlakovou a tahovou zkoušku, zkoušku tvrdosti i pro určování součinitele tření. Software umožňuje víceoperační simulace. Databáze je dostatečně vybavená a je otevřená. Součástí software je i modul TOOL používaný pro rozbor napjatosti a deformace nástrojů. [5]



Obr. č. 2.1 Prostředí programu QForm

2.2 Program FormFEM

Program FormFEM z firmy ITA s. r. o. Je to software pracující metodou konečných prvků ve 2D prostoru s úplnou teplotní vazbou. Pro simulaci lze volit tři typy prvků simulační sítě. Slouží pro simulování tvářecích procesů v oblasti objemového i plošného tváření a to za tepla i za studena a to pro oblasti, kde plastické deformace převyšují výrazně deformace elastické. Řeší také oblast válcování plochých vývalků a protahování. Software načítá geometrie ve formátu DXF. V průběhu výpočtu lze volit automatické přesíťování. Databáze materiálů je poměrně rozsáhlá a otevřená. Součástí simulačního software je také modul pro simulaci tepelného zpracování nasimulovaných tvářených výrobků, tak i součástí pouze tepelně zpracovávají. [2]

Program používá tuhoplastickou formulaci MKP reprezentovanou rovnicí:

$$\int_V \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV + \int_V \sigma_m \dot{\varepsilon}_v dV + \int_V \delta \sigma_m \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \dot{u}_i dS = 0 \quad (2.1)$$

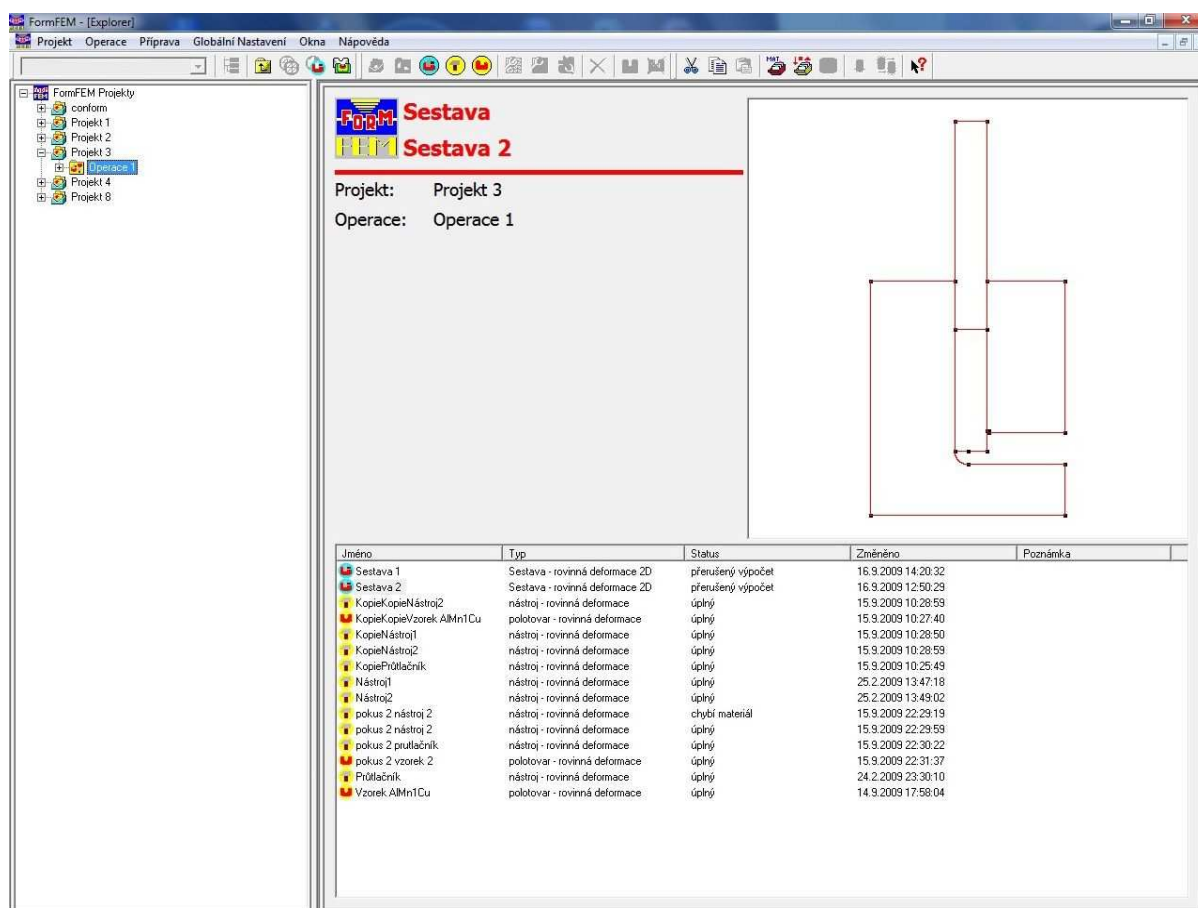
a podmínka nestlačitelnosti:

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z = 0 \quad (2.2)$$

Podmínka nestlačitelnosti je splněna metodou Lagrangeových multiplikátorů. Materiál nemá elastické vlastnosti, což limituje použitou formulaci na řešení tváření za vysokých teplot nebo na problémy, kde elastické deformace jsou v porovnání s plastickými zanedbatelné. Teplotní modul vychází z Fourierovy rovnice, která řešena odděleně od mechanické části. Teplotní modul umožňuje určovat teplotní pole jak v přetvářených tělesech, tak v nástrojích. Vazba mechanického a teplotního výpočtu je provedena přes člen:

$$\int_V \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV = q \quad (2.3)$$

Tento člen reprezentuje množství tepla vzniklého v přetvářeném tělese v důsledku přetvárné práce. Program používá adhezní, coulombovský a kombinovaný model tření. [6]



Obr. č. 2.2 Prostředí programu FormFEM

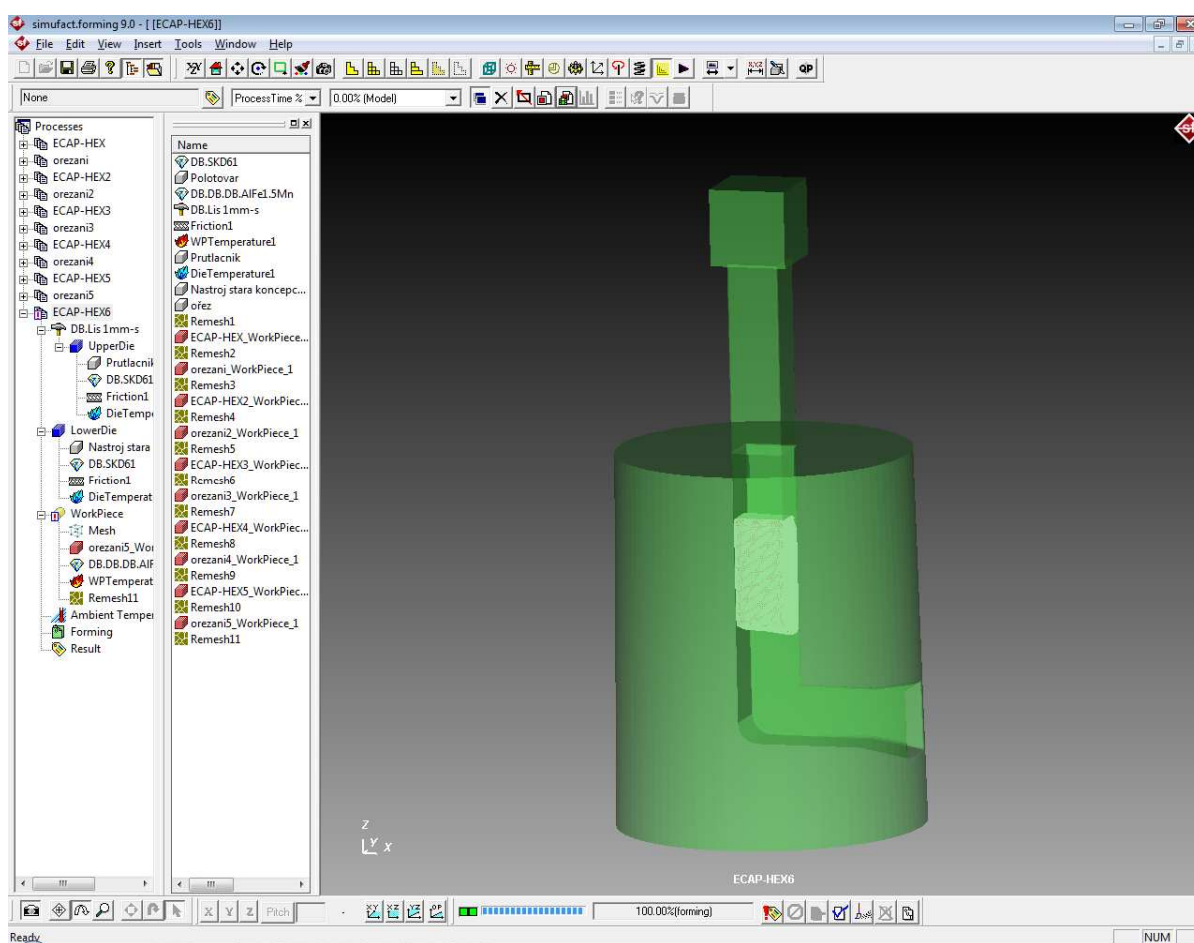
2.3 Program Simufact.forming

Simufact.forming je simulační nástroj, který byl vyvinut speciálně pro tvářecí průmysl. Je to program, který vyvinula firma Simufact (někdejší Femutec) sloučením programů MSC.SuperForge a MSC.Super.Form od MSC.Software, obě doplňkové technologie byly integrovány do jediného výkonného produktu, který je na všechny problémy tvářecí technologie. Software pracuje v režimu 3D prostoru metodou konečných prvků (MKP) nebo objemů (FVM). Je zaměřený na požadavky průmyslu svázaného s tvářecími procesy. Simufact.forming byl vyvinut pro podporu ve všech tvářecích aplikacích, které jsou nezávislé na teplotě procesu, stroje nebo zpracovaného materiálu. Simufact.forming je integrované simulační prostředí pro optimalizaci všech tvářecích procesů:

Zápustkové kování, protlačování, tažení, pýchování, ohýbání, stříhání, volné kování, kruhové válcování, válcování ploch, válcování profilů nebo válcování za studena, za tepla nebo polo-tepla, orbitální tváření, vytlačování, tváření plechů a dokáže i analýzu nástrojů, analýza materiálového toku nebo dielektrické analýzy. [7]

Výhody vyplývající ze zavedení Simufact.formingu:

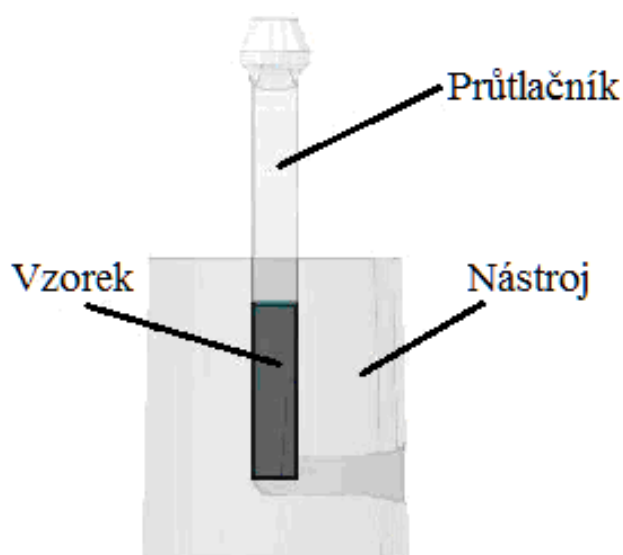
- redukce nákladů pomocí rychlejšího a efektivnějšího procesu zavedení nové technologie,
- zvětšení stability procesů,
- virtuální přezkoušení správného tvaru nástrojů a parametrů procesu,
- zvětšená životnost nástrojů,
- lepší využití strojů,
- rozšíření oblasti nabízených výrobků – výroba složitějších detailů.



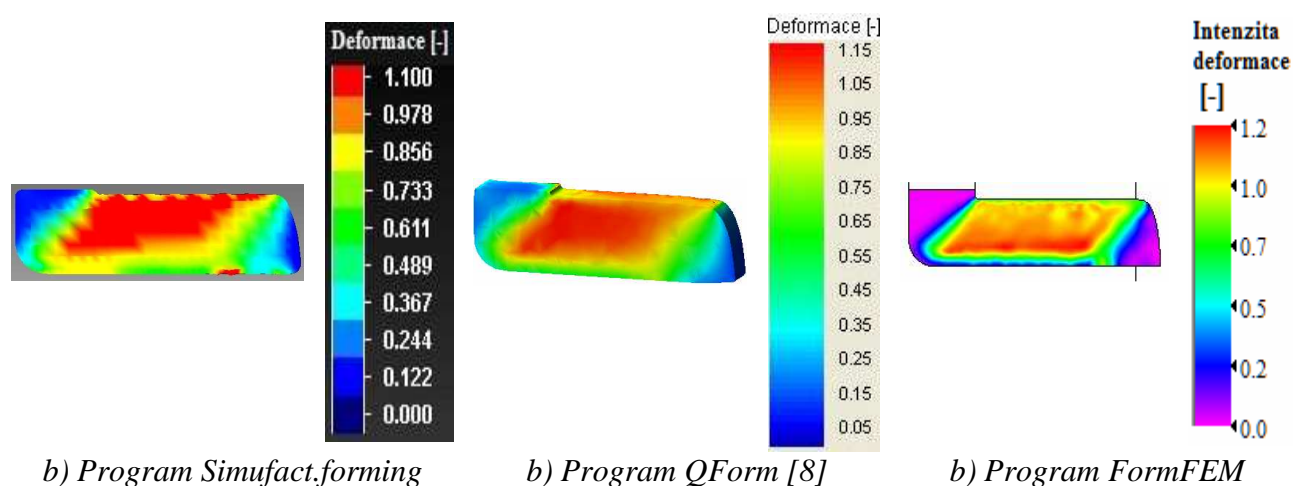
Obr. č. 2.3 Prostředí programu Simufact.forming

2.4 Příklady matematické simulace provedené v programech QForm, Simufact.forming a FormFEM

Pro ukázky matematické simulace ve zvolených programech byla vybrána slitina AlMn1Cu. Slitina byla protlačena nástrojem ECAP bez vyosení při 20°C. Porovnávána byla intenzita deformace a po prvním průchodu nástrojem ECAP.



Obr. č. 2.4 Sestava nástroje ECAP

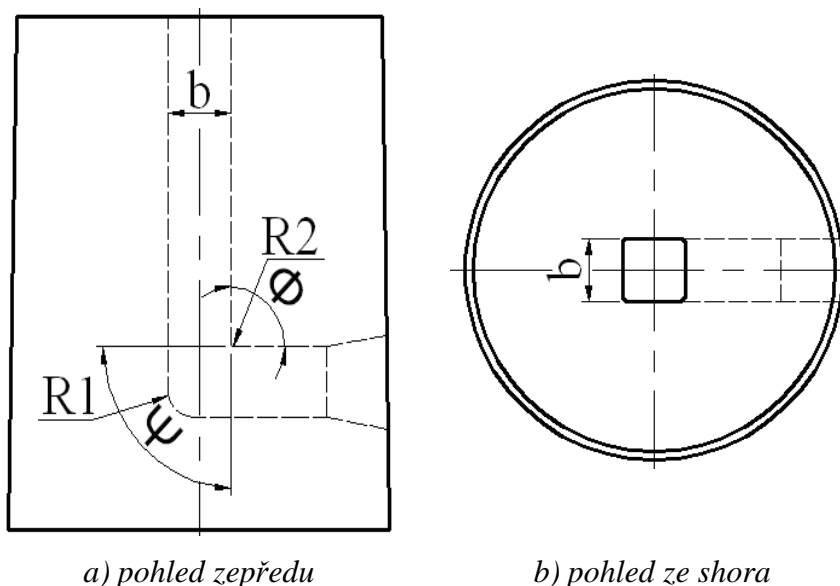


Obr. č. 2.5 Intenzita deformace slitiny AlMn1Cu po 1. průchodu při 20 °C

Průběh intenzity deformace při procesu ECAP v polotovaru ze slitiny AlMn1Cu je ve všech programech podobná. Průměrně hodnota deformace dosahuje 1,15.

2.5 Simulace protlačení litiny AlMn1Cu v programu QForm a Simufact.forming při více průchodech

Byla provedena matematická simulace klasického procesu ECAP s vyšším počtem průchodů pro slitinu AlMn1Cu při 20°C v programu Šorm. Následně byly výsledky ověřeny programem Simufact.forming. Byla vyhodnocena intenzita deformace. Parametry nástroje jsou: šířka kanálu $b = 10$ mm, vnitřní rádius nástroje $R_1 = 4$ mm, vnitřní rádius nástroje $R_2 = 0,5$ mm, vnější úhel $\Psi = 90^\circ$ a vnitřní úhel $\Phi = 90^\circ$. Byl zvolen typ průchodu B_C , který se vztahuje na otáčení o 90° (v pořadí 90° , 180° , 270° a 360°) ve stejném smyslu. Výsledky matematické simulace jsou vyhodnocovány v polovině průřezu vzorku, protože přetvoření se vyskytuje ve vnitřní části vzorku. Průběhy intenzity deformace jsou vyhodnoceny po 1., 3. a 5 průchodu.



Obr. č. 2.7 Schéma nástroje ECAP

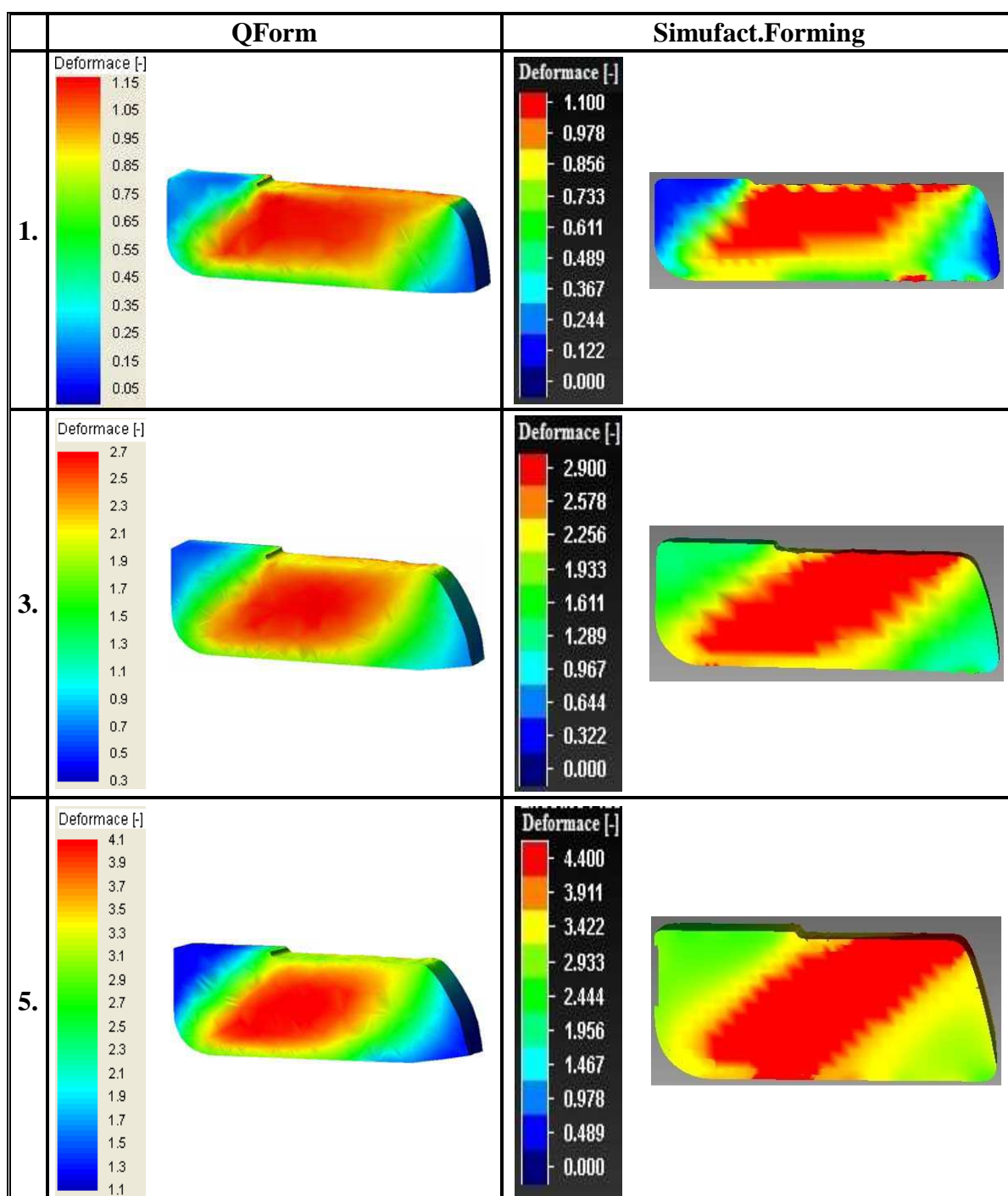
2.5.1 Srovnání obou programů (QForm, Simufact.forming)

Maximální velikost intenzity deformace dosahuje po 1. průchodu hodnoty $\varepsilon_i = 1,1$ (QForm)/1,15 (Simufact.forming). Po 3. průchodu $\varepsilon_i = 2,7/2,9$, po 5. průchodu je její hodnota $\varepsilon_i = 4,2/4,8$ (tab. 2.1; tab. 2.2).

Tab. 2.1 Dosažené deformace v obou programech

Průchod	QForm [8]	Simufact.forming
	Deformace [-]	Deformace [-]
1.	1,1	1,15
3.	2,7	2,9
5.	4,2	4,8

Tab. 2.2 Deformace a napětí slitiny AlMn1Cu v různých programech



2.5.2 Celkové srovnání výsledků

V této části se zabývám srovnáním celkových dosažených výsledků slitiny AlMn1Cu v programu QForm a Simufact,forming při více průchodech s použitím nástroje bez vyosení (viz tab. 2.3).

Tab. 2.3 Deformace slitiny AlMn1Cu v různých programech

–	Program	Průchod				
		1.	2.	3.	4.	5.
Deformace [-]	QForm [8]	1,1	2,0	2,7	3,6	4,2
	Simufact. forming	1,15	2,2	2,9	3,9	4,8

V tabulce č. 2.3 je zřetelný rozdíl mezi hodnotami velikosti intenzity deformace při zvyšujícím počtu průchodů. Z toho vyplývá, že dochází k deformačnímu zpevnění a ke změně struktury materiálu.

Slitina AlMn1Cu vykazovala nepatrný rozdílný průběh velikosti intenzity deformace při použití obou simulačních programů, které mohou být způsobeny různým zadáváním vstupních parametrů – křivek přetvárných odporů nebo hodnot z tahových zkoušek do obou programů. Také jsou vidět i odlišnosti u grafických obrázků simulací, způsobené různými grafickými editory obou programů a také v odlišnosti zadávání v síti konečných prvků.

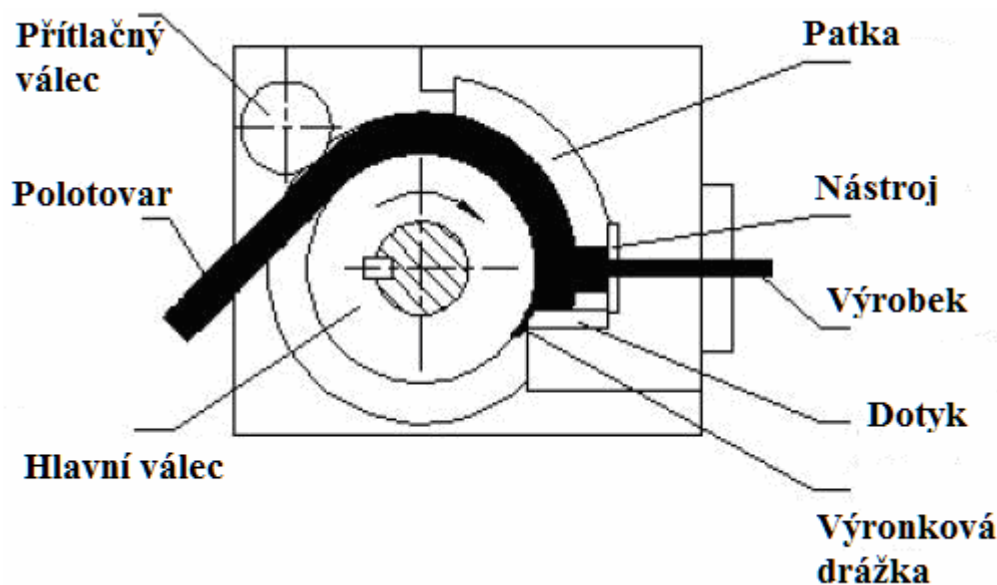
3 MATEMATICKÁ SIMULACE PROTlačOVÁNÍ PÁSU PLECHU NÁSTROJEM DRECE

Pro matematickou simulaci procesu na zařízení DRECE byl zvolen 3D software Simufact.forming 9.0.

3.1 Technologie CONFORM

Conform protlačování bylo vyvinuto jako kontinuální protlačovací metoda ve Spojeném Království v ústavu pro atomovou energii (UKAEA) v roce 1971 a má za sebou historii 40 let.
[1]

Je to metoda opakovaného použití, při které se zkouší dosáhnout velmi vysokého stupně deformace. Má významné výhody: žádné omezení délky produktu, nízká spotřeba energie, snížení nákladů, poměrně nízká investice, vysoká automatizace a efektivnost výroby, vysoký protlačovací poměr a vysoká homogenita. CONFORM tvářecí proces je nejrozšířeněji používaný v efektivní kontinuální výrobě měkkých hliníkových slitin tyčí, trubek, profilů a dutých produktů i měděných drátů a široké spektrum měděných profilů. [3] Zařízení odpovídá protlačovacímu stroji zobrazenému na obr. č. 3.1. [9]



Obr. č. 3.1 Schéma procesu CONFORM [9]

V pracovním procesu je materiál ve formě drátu ze slitiny kovu. Zásada protlačování je, že drát je veden hnacím válcem, který je v případě protlačování drátů opatřen drážkou a s podporou přítlačného válce přes patku tvářecího nástroje. Materiálu brání v dalším posunu tzv. dotyk (zarážka). V důsledku toho dochází ke vzniku vysokých teplot a tvářecích tlaků v materiálu, který se stane plastický. Následně je polotovar vysunut ze zařízení po působení protlačovacího nástroje. [9]

V jednotlivých průchodech dochází k vývinu menšího stupně deformace, což znamená, že tato metoda vyžaduje vyšší množství průchodů pro získání stejného zjemnění struktury, jako u procesu ECAP. [10]

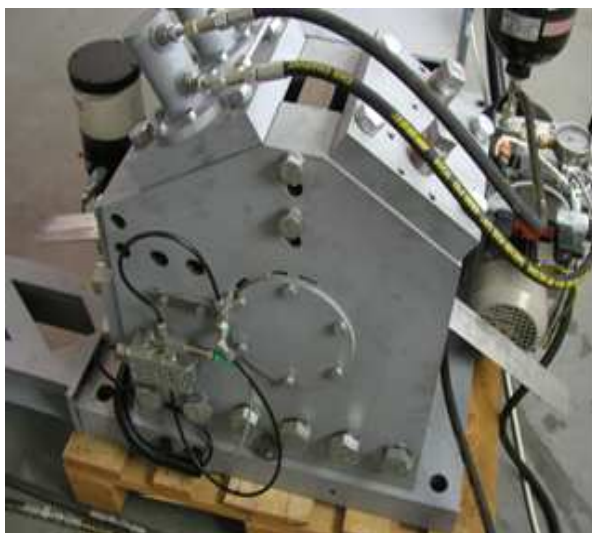
Dochází k tomu, že materiál vytváří teplo třením (teploty až 500°C nebo více), působení tepla je dosaženo vlastním tvářecím procesem. Materiál je ve stavu vysokého plastického toku v důsledku vysoké teploty a změny směru toku po nárazu do zarážky. Protlačovaný materiál je

zcela rekrystalizovaný a je ve tvrzeném stavu. Forma dodávaných materiálů je válcovaný drát. Je možné dosáhnout plynulého protlačování, aniž by bylo nutné zastavit pohon stroje, s cílem spojení dvou nebo více kusů polotovaru dohromady. To je velmi výhodné, protože kusy materiálu se dají spojit dohromady a dají se vyrobiť velké svitky produktů. [1]

3.2 Nástroj DRECE

V roce 2008 bylo uvedeno do zkušebního provozu patentované, prototypové a vývojové zařízení DRECE na pracovišti VŠB-TUO zobrazené na obrázku č. 3.2 a) a b), 3.3 a 3.4. Zařízení DRECE je založeno na procesu CONFORM, které je určeno pro tváření pásu plechu. Zařízení je složeno z hlavních částí: převodovka typu Nord, elektromotor s frekvenčním měničem rychlosti, lamelová spojka, podávací válec a přítlačné válce s regulací přítlačné síly, vlastní tvářecí nástroj z oceli typu Dievar. [10]

Do zařízení se vkládá pás plechu o rozměrech 57x2x1000 mm a pomocí hlavního a vodícího válce a v součinnosti s přítlačným válcem je protlačován tvářecím nástrojem. Při procesu nedochází ke změně příčného průřezu. Při takto prováděné vícenásobné plastické deformaci docílíme podstatného zjemnění struktury. [10]

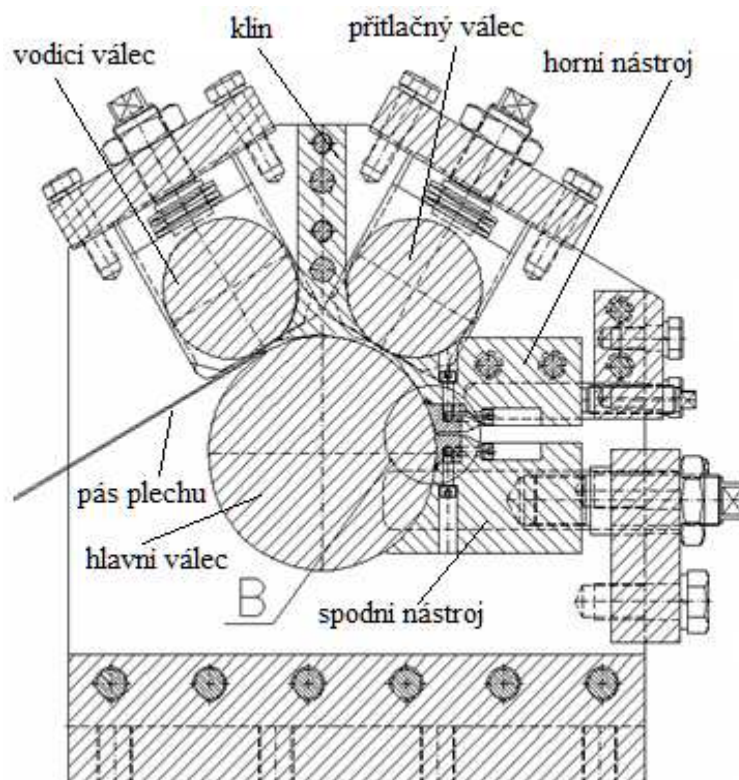


a)

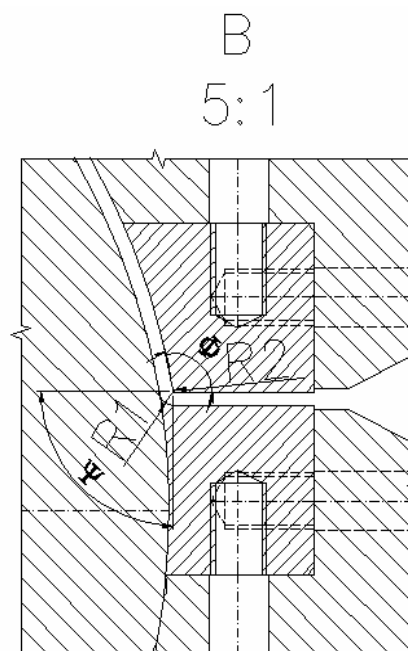


b)

Obr. č. 3.2 Zařízení DRECE



Obr. č. 3.3 Zařízení DRECE v řezu



Obr. č. 3.4 Detail zařízení DRECE

3.3 Srovnání procesů DRECE, CONFORM a C2S2

DRECE - 3 x válec (podávací, přítlačný, hlavní)

- protlačování pásu plechu 57x2x1000
- bez změny příčného průřezu
- nedochází k válcování

CONFORM - 1 x válec (hlavní) + někdy přídatný válec

- válec s drážkou
- protlačování drátů do tvaru drážky
- různé druhy profilů se dají protlačit
- materiál se dá spojit (vznik velkých svitků materiálu)

C2S2 - tenké kovové plechy 1,55 mm

- 2 x válec (vodící a hlavní)
- kombinace procesu ECAP a CONFORM
- dochází k válcování z 1,55 mm na 1,45 mm a následnému protlačení na 1,55 mm

3.4 Použité materiály pro matematickou simulaci procesu DRECE

Pro využívání experimentů na zařízení DRECE v laboratoři VŠB-TUO je používán jako materiál nástroje materiál Dievar. V programu SimufactForming jako materiál nástroje bude použit SKD 61, který je umístěn v databázi programu a je nejbližším ekvivalentem k materiálu Dievar. Pro simulaci byl dále použit materiál vzorku Al99,5 o velikosti 57x2x1000 mm.

3.4.1 Materiál Dievar (materiál nástrojů)

Dievar je Cr – Mo – V nástrojová středně legovaná ocel pro práci za tepla s vysokou houževnatostí a tažností a s vysokou odolností proti opotřebení. Používá se na výrobu forem pro tlakové lití a nástroje pro protlačování kovů. [11]

Tab. č. 3.1 Chemické složení materiálu Dievar [11]

Prvek	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V
[%]	0,3–0,4	4,5–5,5	0,4 – 0,6	1–1,2	≤0,03	≤0,03	0,7–1,2	0,8–1

Tab. č. 3.2 Fyzikální vlastnosti materiálu Dievar [11]

NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	775
Tvrdost	[HB]	230

3.4.2 Materiál SKD 61 (materiál nástrojů)

Z databáze programu SimufactForming byl vybrán pro simulaci materiál SKD 61 dle japonské normy JIS G4404-83, který má nejbližší ekvivalent k materiálu Dievar. Má podobné chemické složení a mechanické vlastnosti. Je to nástrojová legovaná ocel pro práci za tepla. [11]

Tab. č. 3.3 Chemické složení materiálu SKD 61 [11]

Prvek	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V
[%]	0,37–0,43	4,8–5,5	0,3 – 0,5	1,2–1,5	≤0,03	≤0,03	0,9–1,2	0,9–1,1

Tab. č. 3.4 Fyzikální vlastnosti materiálu SKD 61 [11]

NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	791
Tvrdost	[HB]	235

3.4.3 Materiál Al 99,5 (materiál vzorku)

Tento tvářený hliník dle normy ČSN 424005 se používá téměř ve všech oblastech průmyslu (elektrotechnický, letecký, strojírenský, stavební, automobilní atd.) na konstrukční prvky a uzly mechanicky málo namáhané, vyžadující materiál vysoce tvárný, dobře svařitelný, značně korozně odolný, velmi dobře tepelně a elektricky vodivý. Svařitelnost prakticky všemi způsoby. Špatná obrobitelnost řeznými nástroji zaviněna vysokou houževnatostí kovu. Typické výrobky: chladiče automobilů, reflektory, zrcadla, obaly, kryty, nádrže, okenní rámy. [11]

Tab. č. 3.5 Chemické složení materiálu Al99,5 [11]

Prvek	Si	Fe	Cu	Ti	Ostatní	Zn	Al
[%]	0,30	0,40	0,05	0,05	0,03	0,07	99,50

Tab. č. 3.6 Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu Al99,5 [11]

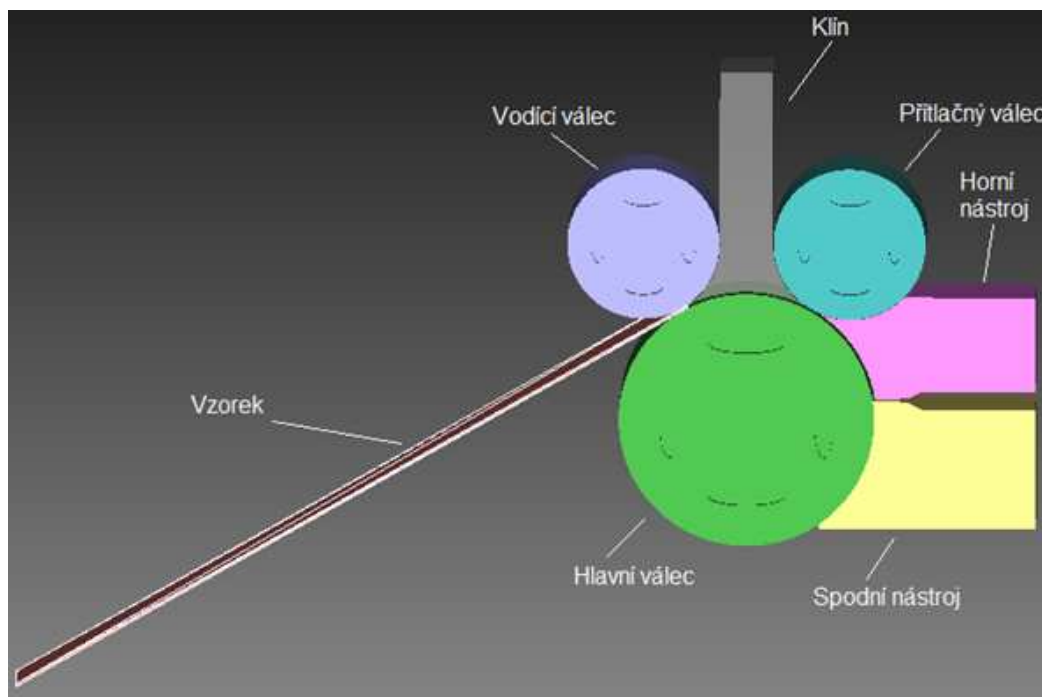
NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	60-110
Modul pružnosti v tahu E	[MPa]	72570
Mez kluzu R_e	[MPa]	70-105
Hustota	[g/ cm ³]	2,700

3.5 Parametry pro matematickou simulaci

Pro matematickou simulaci vytvoříme jednoduchou sestavu nástroje. Na obrázku č. 3.5 je zobrazena sestava nástroje v programu SimufactForming, která je navržena a nakreslena v programu INVERTOR 2009 a zároveň importována do simulačního programu.

Schéma návrhu simulace (viz. obr. 3.5) je vytvořeno s ohledem na co nejpřesnější interpretaci tvářecího zařízení DRECE podle výrobních výkresů stroje.

Nástrojům (hlavní, vodící, přitlačný válec, klín, horní a spodní nástroj) přiřadíme nadefinovaný materiál (Dievar) a okrajové podmínky. Vzorku přiřadíme materiál ve formě Al99,5 (Poissonovo číslo, Konstanta pevnosti, Exponent zpevnění, Youngův modul pružnosti, hustota) a přiřadíme také okrajové podmínky.



Obr. č. 3.5 Sestava nástroje

Okrajové podmínky:

Okrajové podmínky zadáváme proto, abychom přesněji popsali dané prostředí při protlačování vzorku zařízením DRECE. Okrajové podmínky se zadávají do simulačního programu při vytváření sestavení nástroje. Jedná se o tyto okrajové podmínky:

• teplota nástrojů	$T_{\text{nástroj}} = (20^\circ)$	[°C]
• teplota polotovaru	$T_{\text{pol}} = (20^\circ)$	[°C]
• teplota okolí	$T_o = 20$	[°C]
• materiál nástrojů	Dievar (SKD 61)	
• materiál vzorku	Al99,5	
• koeficient tření (plech/válec)	$f = 3$	[-]
• koeficient tření (plech/nástroje)	$f = 0,1$	[-]
• úhlová rychlost hnacího kola	$\omega = 1,72755$	[m/s]
• tlak přítlačného válce	$p = 140$	[MPa]
• přítlak vodícího válce	$p_{\text{př}} = 40$	[N·m]
• průměr kola	$D = 198$	[mm]

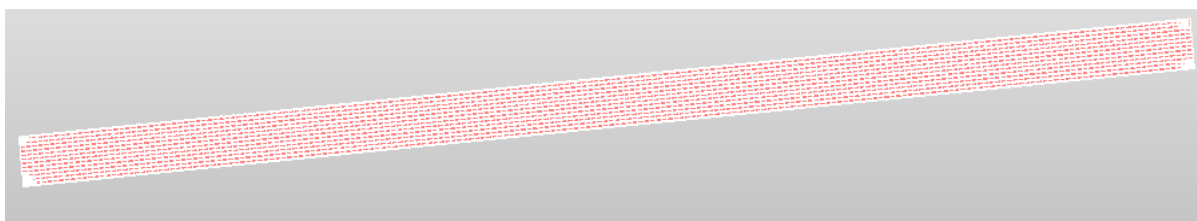
Křivky přetvárného odporu:

Křivky přetvárného odporu jsou důležité pro numerické simulace protlačovacích operací a také pro všechny jejich výpočty.

3.6 Matematická simulace procesu DRECE

Po vytvoření sestavení nástroje a po splnění všech podmínek mohla být spuštěna simulace.

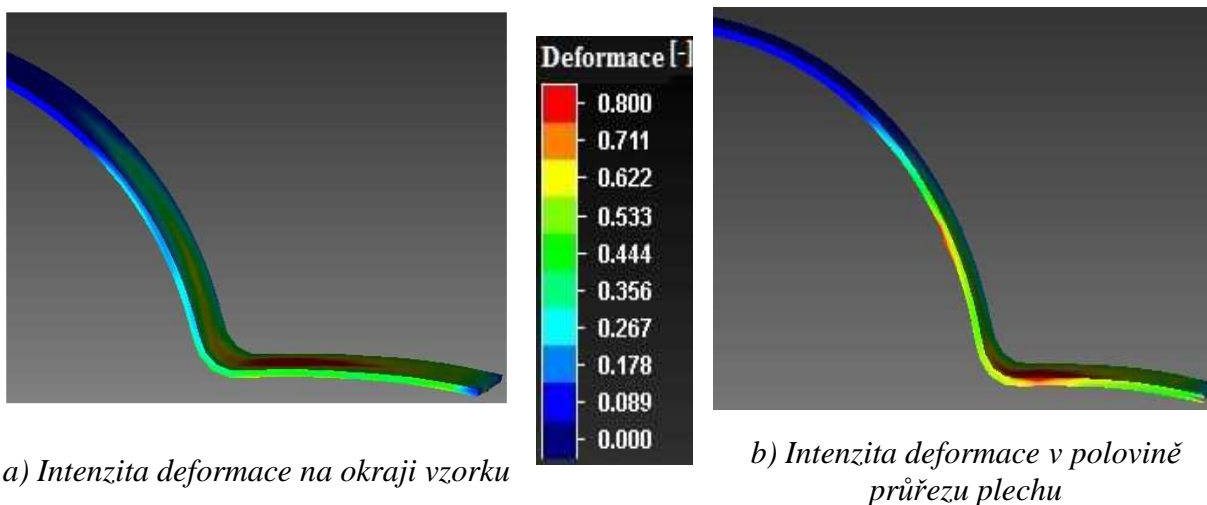
Hlavním úkolem matematické simulace procesu DRECE je protlačení vzorku pásu Al99,5 v programu Simufact.forming. Pás plechu byl protlačen při těchto okrajových podmínkách (kapitola 3.5) a těchto parametrech: $\Phi = 100^\circ$, úhel vnějšího zaoblení $\Psi = 0^\circ$, poloměr $R_1 = 10$ mm a $R_2 = 10$ mm. Deformující těleso (pás plechu) je rozděleno na 7302 prvků (obr. č. 3.6) při velikosti prvku 5 mm. Typ elementu byl zvolen *HEXAHEDRAL* (šestistěny) a zasít'ování *SHEETMESH*. Velikost poloměru byla pro matematickou simulaci zvětšena z hodnoty $R_1 = 2,4$ mm a $R_2 = 0,2$ mm na hodnoty $R_1 = 10$ mm a $R_2 = 10$ mm z důvodu dlouhodobého a nestabilního výpočtu při menším zasít'ování pásu plechu, proto pro zasít'ování byla hodnota velikosti prvku zvolena 5 mm.



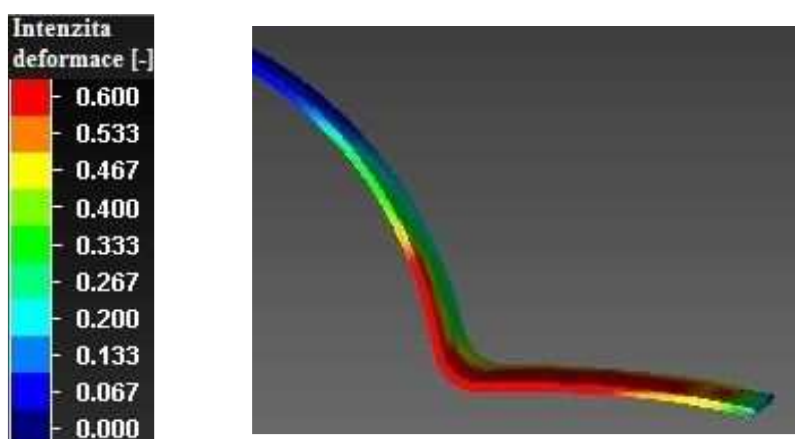
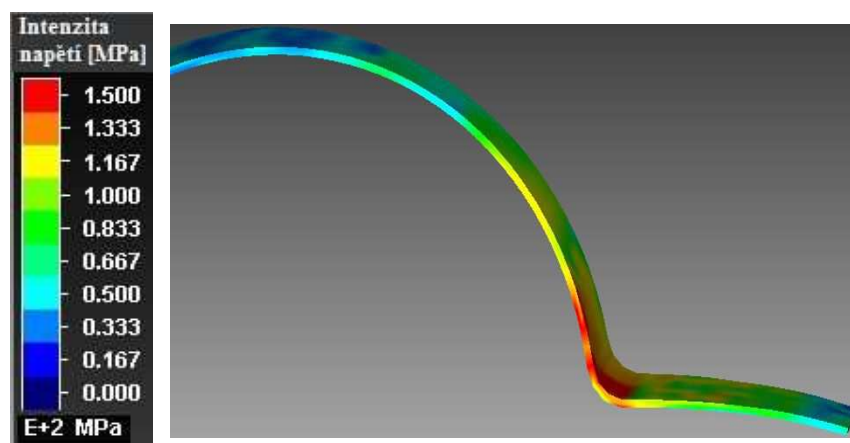
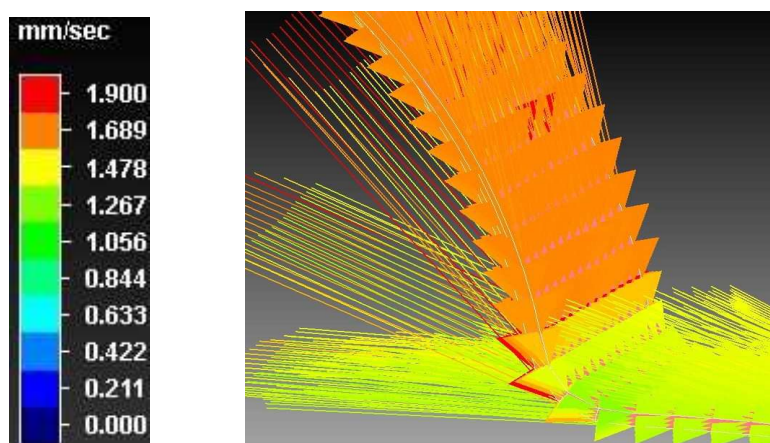
Obr. č. 3.6 FE modul pásu plechu pro simulaci

3.6.1 Vlastní simulace (program Simufact.forming)

Výsledky matematické simulace jsou vyhodnocovány pro přesnější výsledky v polovině průřezu plechu. Velikost intenzity deformace a napětí je větší na povrchu než uvnitř vzorku vlivem působení tření mezi válcem a plechem (viz obr. č. 3.7).



Obr. č. 3.7 Intenzita deformace na okraji a v polovině průřezu plechu

Parametry dosažené po 1. průchodu nástrojem DRECE:*Obr. č. 3.8 Intenzita deformace po 1. průchodu nástrojem DRECE**Obr. č. 3.9 Intenzita napětí po 1. průchodu nástrojem**Obr. č. 3.10 Velikost rychlosti tečení kovu po 1. průchodu*

Velikost intenzity deformace dosahuje po 1. průchodu maximální hodnoty $\varepsilon_i = 0,6$. (obr. č. 3.8). Velikost intenzity napětí dosahuje maximální hodnoty po 1. průchodu $\sigma_i = 150$ MPa (obr.

č. 3.9). Maximální intenzita deformace a napětí byla tedy naměřena okolo oblasti spodního a horního nástroje, kde přechází pás plechu přes jejich zaoblení.

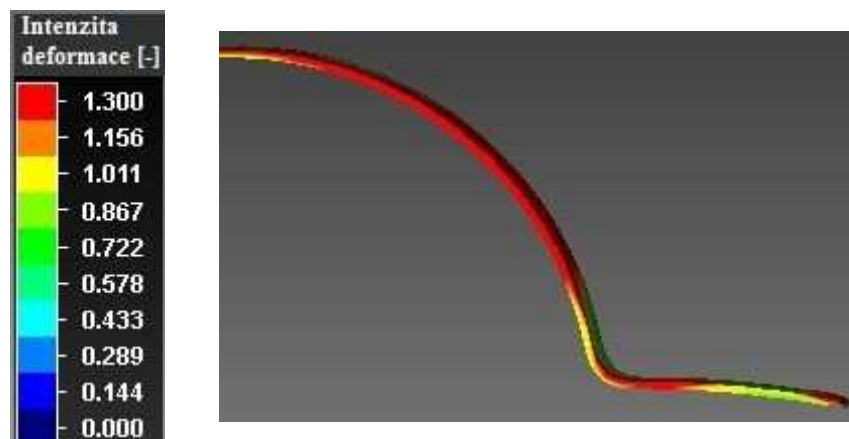
Střední velikost vektoru rychlosti tečení materiálu dosahovala hodnoty 1,9 mm/s v souladu s předpoklady simulace – v ohnisku deformace. Působí zde protichůdné faktory. Největší součinitel tření chceme dosáhnout ve styku plechu s podávajícím válcem a nejmenšího součinitele ve vlastním tvářecím nástroji, tzn. vliv mazání se musí projevit jen ve vlastním nástroji. Průběhy vektorů rychlosti toku materiálu jsou uvedeny na obr. č. 3.10.

Tab. č. 3.7 Parametry dosažené při 1. průchodu nástrojem DRECE

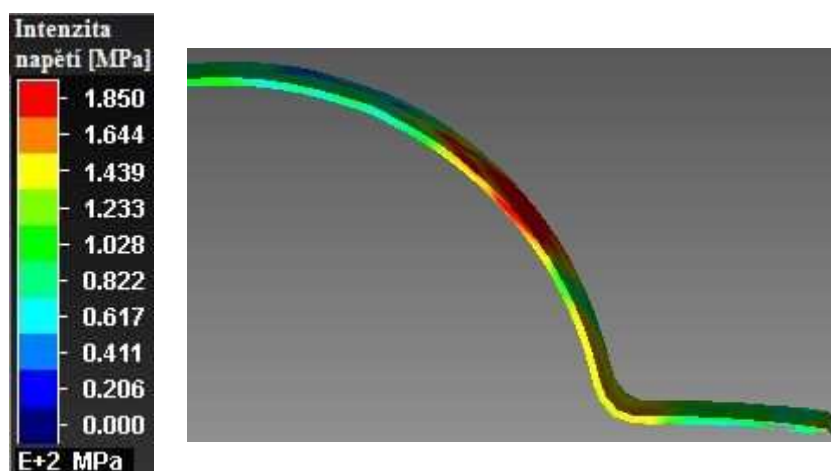
Intenzita deformace ϵ_{\max} [-]	Intenzita napětí σ_{\max} [MPa]	Rychlost vektoru tečení kovu [mm/s]	Tlak na nástroj p_{\max} [MPa]
0,6	150	1,9	356

Parametry dosažené po 2. průchodu nástrojem DRECE:

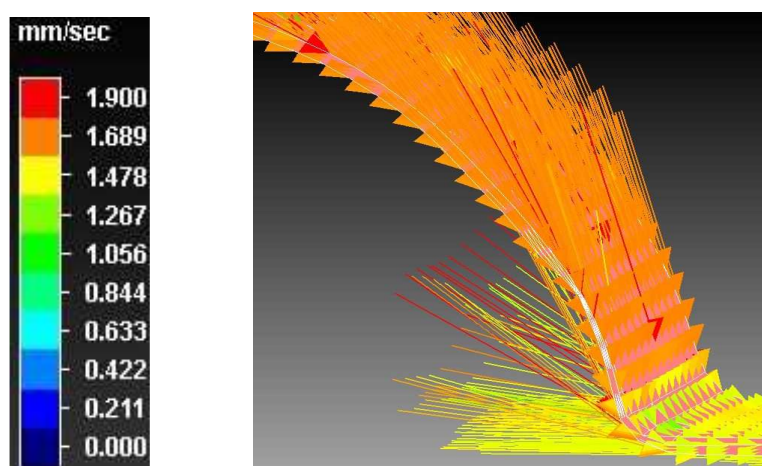
Velikost intenzity deformace dosahuje po 2. průchodu maximální hodnoty $\epsilon_i = 1,3$. Velikost intenzity napětí dosahuje maximální hodnoty po 2. průchodu $\sigma_i = 185$ MPa. Vyšší hodnota intenzity deformace a napětí byla způsobena zvolením vyššího přítlaku na přítlačném válci a také vlivem zvoleného velkého tření mezi hlavním válcem a pásem plechu.



Obr. č. 3.11 Intenzita deformace po 2. průchodu nástrojem DRECE



Obr. č. 3.12 Intenzita napětí po 2. průchodu nástrojem



Obr. č. 3.13 Velikost rychlosti tečení kovu po 2. průchodu

Největší hodnota střední velikosti rychlosti toku materiálu byla dosažena 1,9 mm/s. Rozložení velikostí vektorů rychlosti tečení materiálu mělo obdobný průběh jako při 1. průchodu nástrojem DRECE. (obr. č. 3.13)

Tab. č. 3.8 Parametry dosažené při 2. průchodu nástrojem DRECE

Intenzita deformace ϵ_{\max} [-]	Intenzita napětí σ_{\max} [MPa]	Rychlost vektoru tečení kovu [mm/s]	Tlak na nástroj p_{\max} [MPa]
1,3	185	1,9	420

3.7 Vlastní experiment proveden na zařízení DRECE

Byl protlačen pás plechu materiálu Al99,5 a pás mědi Cu99,5 zařízením DRECE o rozměru 57x2x1000 mm (šířka (b) x tloušťka (t) x délka (l)). Po každém protlačení došlo k otočení pásu plechu o 180°. Vzorky plechu Al99,5 uvedené na obr. č. 3.14 a 3.15 a vzorky Cu99,5 na obr. č. 3.16 a 3.17 jsou před procesem protlačování a po několikanásobném protlačení. Na obr. č. 3.14 je zobrazen výchozí stav plechu z Al99,5 a na obr. č. 3.15 je pás plechu Al99,5 po 2. průchodu nástrojem DRECE. Na obr. č. 3.16 je zobrazen výchozí stav plechu z Cu99,5 a na obr. č. 3.17 je pás plechu Cu99,5 po 4. průchodu.



Obr. č. 3.14 Pás plechu Al99,5 před protlačáním



Obr. č. 3.15 Pás plechu Al99,5 protlačený zařízením DRECE



Obr. č. 3.16 Pás plechu Cu99,5 před protlačáním



Obr. č. 3.17 Pás plechu Cu99,5 protlačený zařízením DRECE

3.7.1 Použité materiály pro experiment při procesu DRECE

Materiál Al99,5:

Materiál je popsán v kapitole 3.3.3.

Materiál Cu99,5:

Tato tvářená měď pro všeobecné účely dle ČSN 423000 se používá jako konstrukční materiál na součásti strojů a zařízení ve strojírenském, chemickém a potravinářském průmyslu. [11]

Tab. č. 3.9 Chemické složení materiálu Cu99,5 [11]

Prvek	Al	Cu	As	Bi	Fe	O	Pb	Sb	Sn
[%]	0,05	99,5	0,1	0,01	0,05	0,1	0,1	0,08	0,15

Tab. č. 3.10 Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu Cu99,5 [11]

NÁZEV VLASTNOSTÍ	JEDNOTKY	HODNOTY
Mez pevnosti R_m	[MPa]	220
Modul pružnosti v tahu E	[MPa]	130000
Mez kluzu R_e	[MPa]	60
Tažnost	[%]	50
Hustota	[g/cm ³]	8.940
Teplota tání	[°C]	1083

3.7.2 Mazivo GLEIT - $\mu^{\text{®}}$ HP 515

Při protlačování vzorku zařízením DRECE bylo prováděno mazání tenkou vrstvou maziva GLEIT - $\mu^{\text{®}}$ HP 515 určeno pro tváření za studena, které je nanášeno mezi pás plechu a vlastní tvářecí nástroj v zóně deformace. [12]

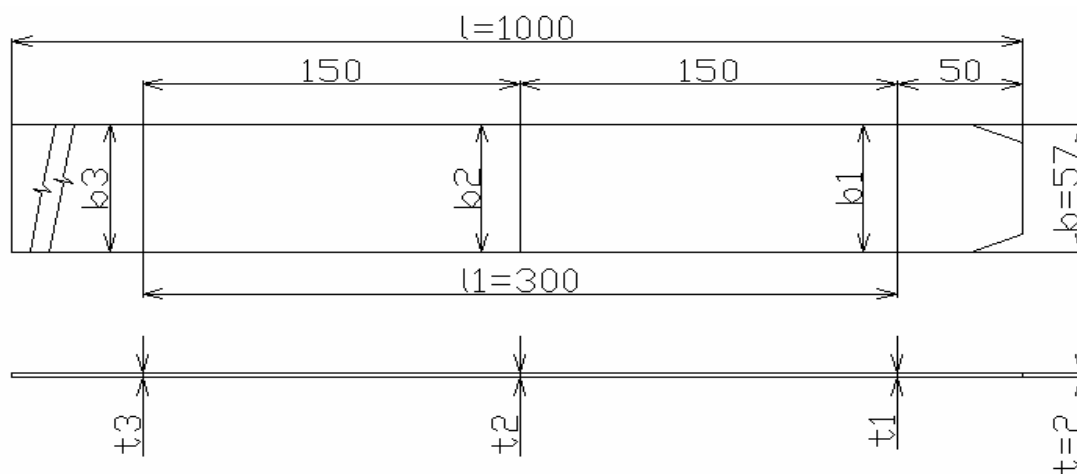
GLEIT - $\mu^{\text{®}}$ HP 515 je homogenní pasta světlé barvy s extrémně vysokým podílem bílých pevných maziv. Jako hlavní nosič jsou speciálně zvolené minerální oleje. Velmi dobrá odolnost proti velkým tlakům, ideální pro tváření s působením velkých sil a tlaků. Vlastnosti maziva popsány v tabulce č. 3.11. [12]

Tab. č. 3.11 Vlastnosti maziva GLEIT 515 [12]

Barva	bílá
Základní olej	minerální
Hustota	1,3 g/cm ³
Penetrace	265-295 mm/10
Třída konzistence	2
Rozsah použití teploty	-25 až +100 °C

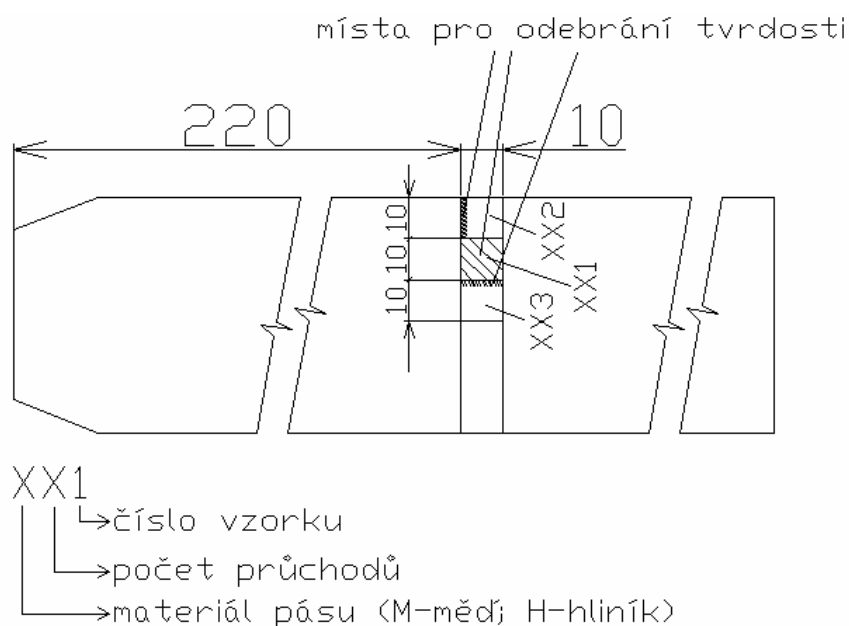
3.7.3 Výsledky experimentů dosažených na zařízení DRECE

Experimenty byly měřeny v místech zobrazené na obr. č. 3.18.



Obr. č. 3.18 l_1 ; t_1 ; t_2 ; t_3 ; b_1 ; b_2 ; b_3 -měřená místa na experimentu

Vzorky pro vyhodnocení tvrdosti se brali z pásu plechu 220 mm od předního okraje (označené na obr č. 3.19 jako XX1; XX2; XX3).



Obr. č. 3.19 Označená místa pro odebrání vzorků pro měření tvrdosti

Z místa pro odebrání tvrdosti (HV5) označené jako XX1 budeme brát naměřené hodnoty z povrchu vzorku. U vzorku s označením XX2 hodnoty tvrdosti byly měřeny z vnitřní strany vzorku (příčný řez vzorku). U XX3 bude vyhodnocována vnější strana vzorků (podélný řez plechu). Místa pro odebrání vzorků jsou zobrazeny na obr. č. 3.19.

Provedené experimenty

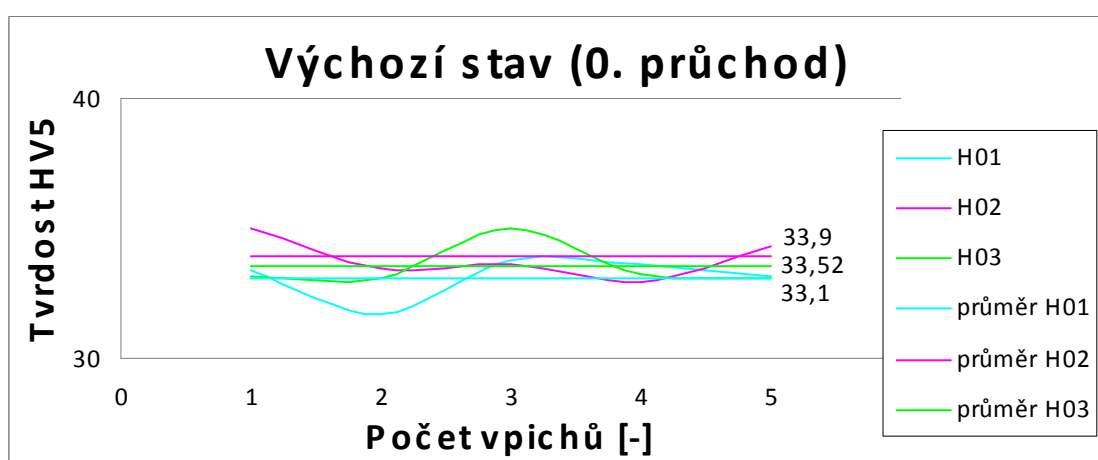
Hodnoty tvrdostí dle Vickerse (HV5) pásu plechu z Al99,5:

- výchozí stav plechu Al99,5

Tab. č. 3.12 Tabulka naměřených tvrdostí

vzorek:	měření:	tvrdost:	x = 33,10	vzorek:	měření:	tvrdost:	x = 33,90	vzorek:	měření:	tvrdost:	x = 33,52
H01	1	33,38		H02	1	35,02		H03	1	33,19	
	2	31,73			2	33,50			2	33,06	
	3	33,76			3	33,63			3	35,02	
	4	33,63			4	32,94			4	33,25	
	5	33,19			5	34,28			5	33,06	

x...Aritmetický průměr hodnot



Graf 3.1 Výchozí stav (0. průchod)

V tab. č. 3.12 a grafu 3.1 je vidět, že největší průměrná hodnota tvrdosti byla naměřena na vzorku H03 (35,02 HV5) v podélném řezu pásu.

- plech Al99,5 po 8. průchodu:

- číslo zkoušky: 100503-1 (Tab. č. 3.13)

Tab. č. 3.13 Tabulka naměřených hodnot

průchod	otočení [°]	l x š x t [mm]							mazání	tlak [bar]	přítlak [Nm]
		l ₁	b ₁	b ₂	b ₃	t ₁	t ₂	t ₃			
0		300	58,08	58,02	58,01	1,90	1,93	1,92			
1	0	301	58,46	58,37	58,14	1,79	1,90	1,88	ano	100	40
2	180	305	58,63	58,43	58,36	1,86	1,92	1,91	ano	100	40
3	0	307	58,62	58,68	58,57	1,87	1,89	1,87	ano	100	40
4	180	312	58,68	58,70	58,52	1,84	1,85	1,89	ano	100	40
5	0	315	58,80	58,54	58,56	1,89	1,78	1,89	ano	120	40
6	180	320	59,05	58,67	58,63	1,86	1,78	1,91	ano	120	40
7	0	321	58,98	58,76	58,96	1,89	1,75	1,90	ano	140	60
8	180	323	59,02	58,86	58,98	1,87	1,73	1,91	ano	140	60

V tabulce č. 3.13 jsou znázorněny hodnoty naměřené na vzorku plechu z Al99,5 při protlačování nástrojem DRECE. Hodnoty se měřili v místech, které jsou označené na obr. č. 3.18. Hodnoty slouží pro lepší představu a zjištění chování pásu plechu při průchodech nástrojem DRECE. V tabulce jde vidět, že během protlačování docházelo k prodlužování pásu plechu. Plech byl prodloužen o hodnotu 23 mm.

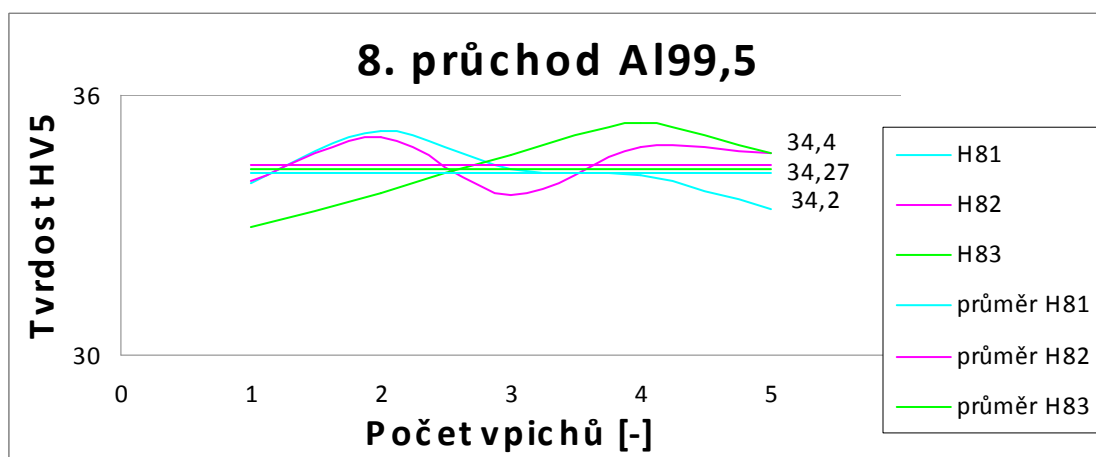
- tabulka naměřených tvrdostí (HV5) po 8. průchodu Al 99,5 (Tab. č. 3.14):

Tab. č. 3.14 Tabulka naměřených tvrdostí

vzorek:	měření:	tvrdost:		vzorek:	měření:	tvrdost:		vzorek:	měření:	tvrdost:	
H81	1	33,16	$\bar{x} = 34,2$	H82	1	34,02	$\bar{x} = 34,4$	H83	1	32,94	$\bar{x} = 34,27$
	2	35,16			2	35,02			2	33,76	
	3	34,28			3	33,70			3	34,61	
	4	34,15			4	34,82			4	35,36	
	5	33,38			5	34,68			5	34,68	

x...Aritmetický průměr hodnot

- graf po 8. průchodu (Graf 3.1):



Graf 3.2 Al99,5 po 8. průchodu

Z tab. č. 3.15 a grafu 3.2 jde vidět, že největší průměrná hodnota tvrdosti byla naměřena na vzorku H83. Hodnoty tvrdosti se lišily na všech vzorcích při 8. průchodu jen nepatrně. Největší hodnota tvrdosti byla naměřena 35,36 HV5. (na vzorku, v podélném řezu pásu plechu)

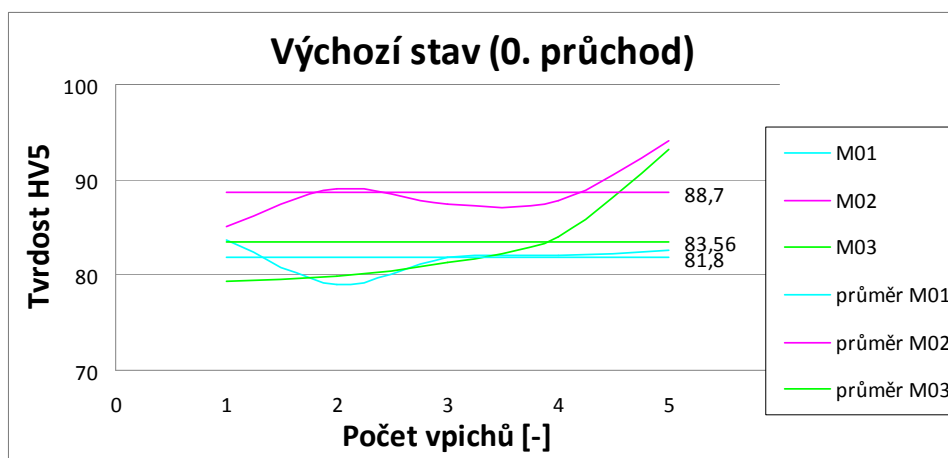
Hodnoty tvrdostí dle Vickerse (HV5) pásu plechu z Cu99,5:

– výchozí stav plechu Cu99,5 (0. průchod) – viz tab. č. 3.15

Tab. č. 3.15 Tabulka naměřených tvrdostí

vzorek:	měření:	tvrdost:		vzorek:	měření:	tvrdost:		vzorek:	měření:	tvrdost:	
M01	1	83,60	$\bar{x} = 81,8$	M02	1	85,12	$\bar{x} = 88,7$	M03	1	79,26	$\bar{x} = 83,56$
	2	79,02			2	89,13			2	79,95	
	3	81,87			3	87,49			3	81,38	
	4	82,11			4	87,76			4	84,10	
	5	82,60			5	94,02			5	93,13	

– graf výchozího stavu (Graf 3.3):



Graf 3.3 Cu 99,5 výchozí stav plechu

V tab. č. 3.15 a grafu 3.3 je vidět, že největší průměrná hodnota tvrdosti byla naměřena na vzorku M02 (88,74,02 HV5).

– plech Cu99,5 po 10. průchodu:

– číslo zkoušky: 100331-1 (Tab. č. 3.15)

Tab. č. 3.16 Tabulka naměřených hodnot

průchod	otočení [°]	l x š x t [mm]							mazání	tlak [bar]	přítlak [Nm]
		l ₁	b ₁	b ₂	b ₃	t ₁	t ₂	t ₃			
0		300	57,56	57,7	57,76	2	1,98	1,98			
1	0	294	57,96	58,07	58,26	1,99	2,04	2,05	ano	100	40
2	180	291	58,11	58,17	58,37	2,02	2,04	2,07	ano	100	40
3	0	289	58,14	58,39	58,54	2,05	2,08	2,09	ano	100	40
4	180	286	58,28	58,46	58,67	2,05	2,13	2,1	ano	120	40
5	0	285	58,39	58,7	58,68	2,04	2,09	2,12	ano	120	40
6	180	284	58,43	58,81	58,95	2,02	2,1	2,12	ano	120	40
7	0	283	58,57	58,97	59,1	2,07	2,12	2,16	ano	120	40
8	180	281	58,69	58,92	59,24	2,03	2,13	2,2	ano	120	40
9	0	281	58,8	59,3	59,4	2,0	2,12	2,18	ano	120	40
10	180	281	58,97	59,32	59,65	2,0	2,12	2,17	ano	120	40

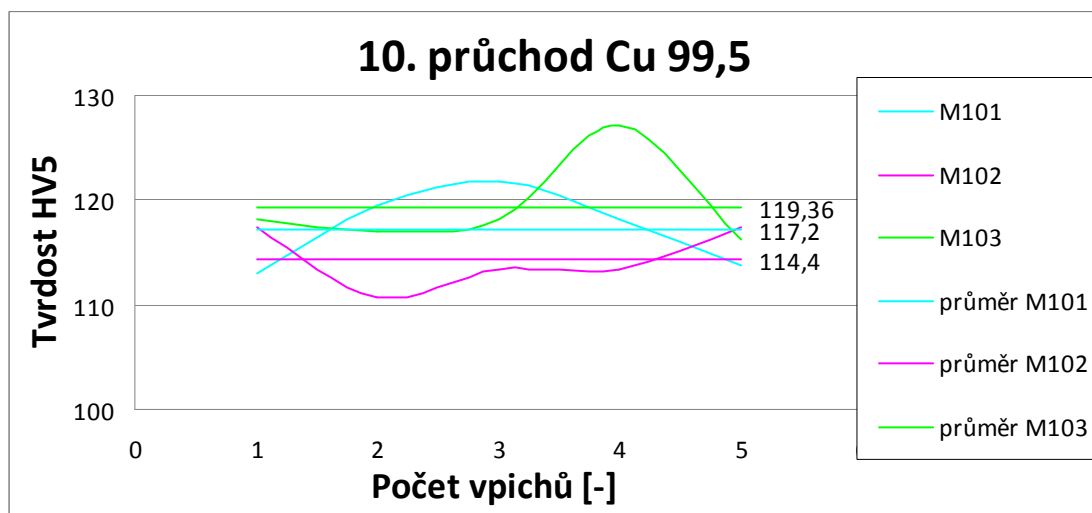
V tabulce č. 3.16 jsou uvedeny hodnoty po 10. průchodu protlačování plechu Cu 99,5 nástrojem DRECE. Hodnoty byly změřeny v místech, které jsou uvedeny na obr. č. 3.18. Během protlačování dochází k napěchování vzorku. Při 10. průchodu došlo ke zkrácení měřené části vzorku o 19 mm. Proces vykazuje vysokou efektivitu (viz tabulka č. 3.15 a 3.16 naměřených tvrdostí HV5).

- tabulka naměřených tvrdostí HV5 (Tab. č. 3.16) :

Tab. č. 3.17 Tabulka naměřených tvrdostí

vzorek:	měření:	tvrdost:		vzorek:	měření:	tvrdost:		vzorek:	měření:	tvrdost:	
M101	1	112,94	$\bar{x} = 117,2$	M102	1	117,40	$\bar{x} = 114,4$	M103	1	118,24	$\bar{x} = 119,36$
	2	119,52			2	110,61			2	116,98	
	3	121,69			3	113,33			3	118,24	
	4	118,24			4	113,33			4	127,16	
	5	113,73			5	117,40			5	116,16	

- grafy po 10. průchodu (Graf 3.4):



Graf 3.4 Cu 99,5 po 10. průchodu

V tab. č. 3.17 a grafu 3.4 lze vyčíst, že největší průměrná hodnota tvrdosti byla naměřena na vzorku M103 (127,16 HV5). Na vzorku, v podélném řezu pásu plechu.

Z grafů a tabulek je patrné, že docházelo ke zvyšování tvrdostí vlivem zvyšujících počtů průchodů. Při protlačování nástrojem DRECE docházelo u vzorků z Al99,5 k prodloužení. Prodloužení mohlo být způsobeno vlivem přítlaku na vodícím válci a tlaku na přítlačném válci, kdy mohlo dojít k mírnému stlačení plechu. Materiál Al99,5 je měkčí a méně se zpevňuje než plech z Cu99,5. V tab. č. 3.18 a 3.19 jsou uvedeny změny tloušťky v závislosti na délce u Cu99,5 a Al99,5. U plechu z Cu99,5 došlo k opačnému procesu k napěchování.

Příčina velmi malého stupně napěchování mohla být způsobena nepatrným zvětšením protlačovací mezery v zóně deformace.

Tab. č. 3.18 Tabulka hodnot změny tloušťky na délce plechu pro plech Cu99,5

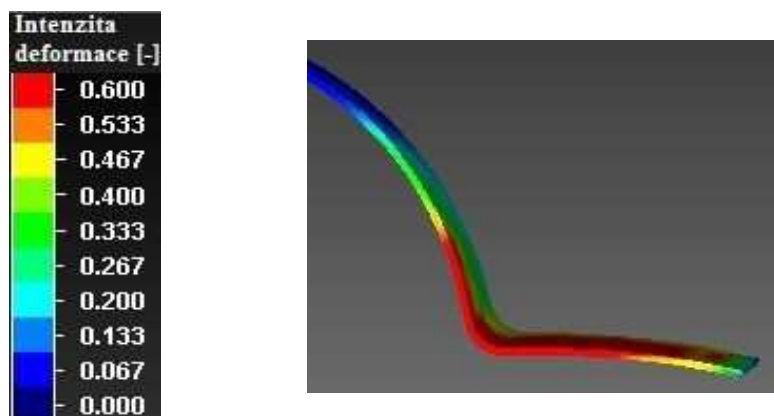
Cu				
Průchod	l_1	t_1	t_2	t_3
0	300	2	1,98	1,98
2	291	2,02	2,04	2,07
4	286	2,05	2,13	2,1
6	284	2,02	2,1	2,12
8	281	2,03	2,13	2,2
10	281	2	2,12	2,17

Tab. č. 3.19 Tabulka hodnot změny tloušťky na délce plechu pro plech Al99,5

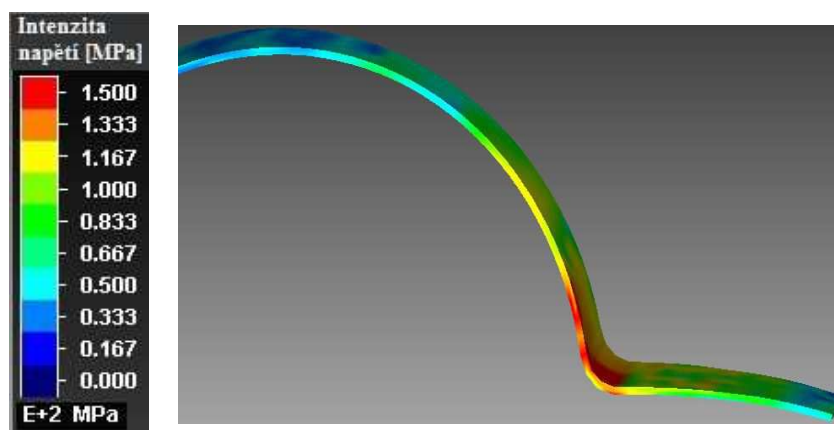
Al				
Průchod	l_1	t_1	t_2	t_3
0	300	1,90	1,93	1,92
2	305	1,86	1,92	1,91
4	312	1,84	1,85	1,89
6	320	1,86	1,78	1,91
8	323	1,87	1,73	1,91

3.8 Porovnání matematické simulace s experimentem

Na obr. č. 3.20 je zobrazen výsledek numerické simulace. V tabulce č. 3.18 jsou uvedeny hodnoty intenzity deformace po 1. a 2. průchodu.



Obr. č. 3.20 Intenzita deformace po 1. průchodu nástrojem DRECE



Obr. č. 3.9 Intenzita napětí po 1. průchodu nástrojem

Tab. č. 3.20 Celkové dosažené hodnoty při průchodu nástrojem DRECE

Průchod	Intenzita deformace ϵ_{\max} [-]	Intenzita napětí σ_{\max} [MPa]
1.	0,6	150
2.	1,3	185

Na obr. č. 3.21 je zobrazen výsledek provedeního experimentu. V tabulce č. 3.20 jsou uvedeny hodnoty tvrdostí HV5 po 0., 2., 4., 6., 8. a 10. průchodu.



Obr. č. 3.21 Pás plechu Cu99,5 protlačený po 4. průchodu zařízením DRECE

Tab. č. 3.21 Celková tabulka tvrdostí HV5 při různých průchodech pásu plechu Cu99,5

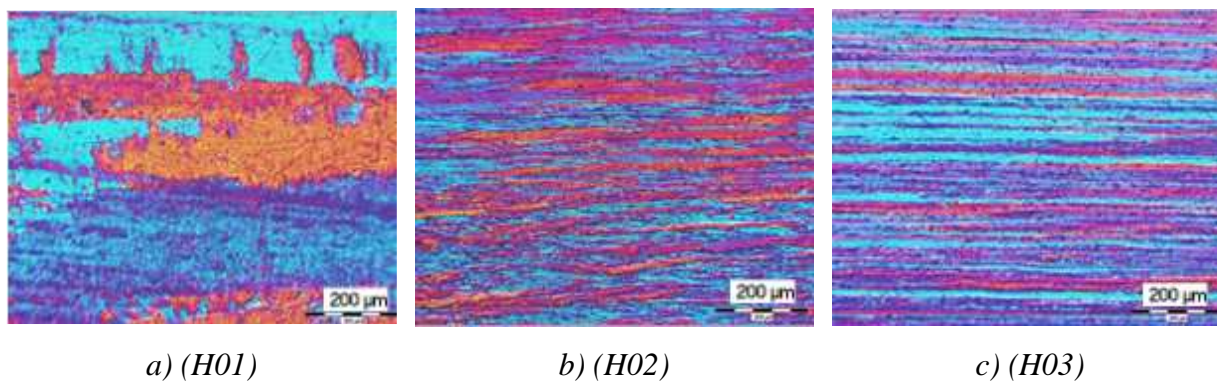
Průchod	Průměrná hodnota tvrdosti HV5		
	MX1	MX2	MX3
0	81,8	88,7	83,56
2	105	94,8	97,27
4	112,6	102,6	100,61
6	114,2	102,9	108,20
8	111,9	113,9	108,97
10	117,2	114,4	119,36

Jak v tab. č. 3.20, kde je znázorněn rozdíl mezi hodnotami intenzity deformace po 2. průchodech, tak i na obr. č. 4.5 a 4.6, na kterých je prokázáno znatelné zjemnění struktury. Tomuto jevu odpovídá i zvýšení tvrdosti (mechanických vlastností) uvedené v tab. č. 3.21. Všechny tyto výsledky zvýšení tvrdostí a hodnot deformace a zjemnění struktury jsou způsobeny vzrůstajícím počtem průchodů. Dochází ke zjemnění struktury tak i k deformačnímu zpevnění vlivem vícenásobné plastické deformace. Matematická simulace s porovnáním s experimentem potvrdila daný předpoklad.

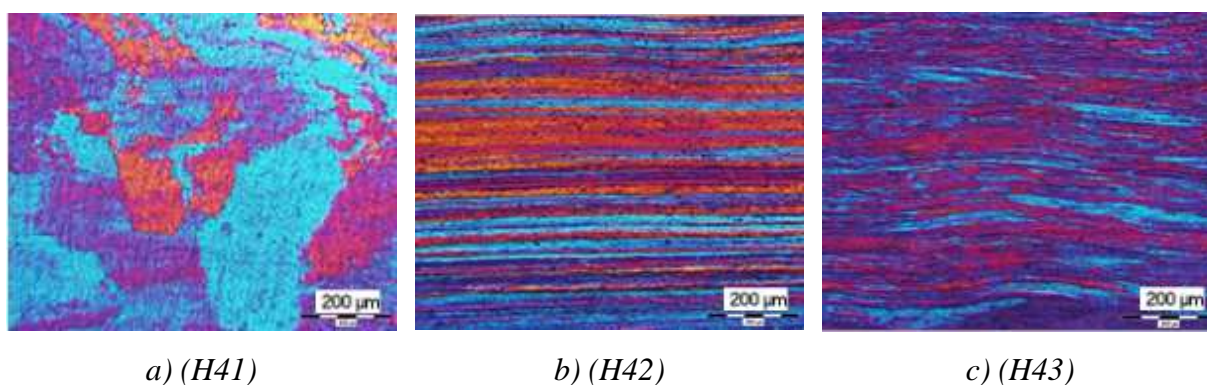
4 METALOGRAFICKÁ ANALÝZA

4.1 Vliv počtu průchodů na velikost zrna Al99,5

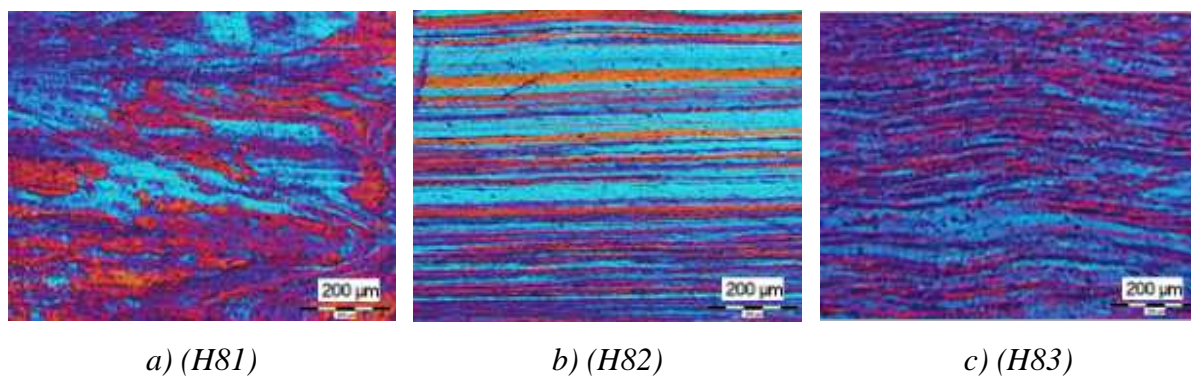
Vzorky byly metalograficky vyhodnoceny na optickém mikroskopu ve spolupráci s fakultou Metalurgie a materiálového inženýrství na VŠB-TUO a byla vyhotovena série metalografických vyhodnocení pro pás plechu z Al99,5.



Obr. č. 4.1 Struktura vzorku plech Al99,5 – výchozí stav (H0)



Obr. č. 4.2 Struktura vzorku plech Al99,5 – 4. průchod (H4)



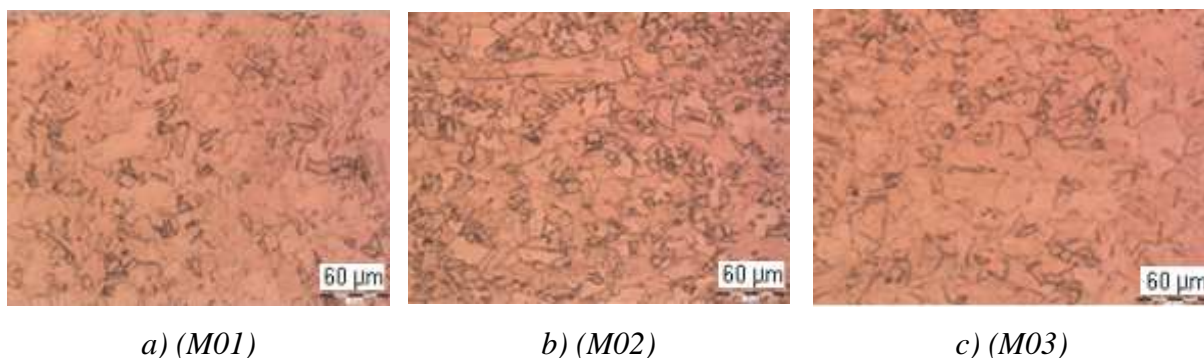
Obr. č. 4.3 Struktura vzorku plech Al99,5 – 8. průchod (H8)

Byly metalograficky vyhodnoceny vzorky (HX1-rovnoběžný směr se směrem protlačování – viz obr. č. 4.1 a), 4.2 a), 4.3 a), HX2-příčný řez pásu plechu – viz obr. č. 4.1 b), 4.2 c), 4.3 c), HX3-podélný řez pásu plechu – viz obr. č. 4.1 c), 4.2 c), 4.3 c)). Z uvedené metalografické analýzy výchozího stavu plechu a po jednotlivých průchodech (zobrazeno na obr. č. 4.1, 4.2 a 4.3) vyplývá, že dochází ke změně struktury a pozvolnému změně (zmenšení) střední velikosti zrna vlivem narůstajícímu počtu cyklů protlačování nástrojem DRECE..

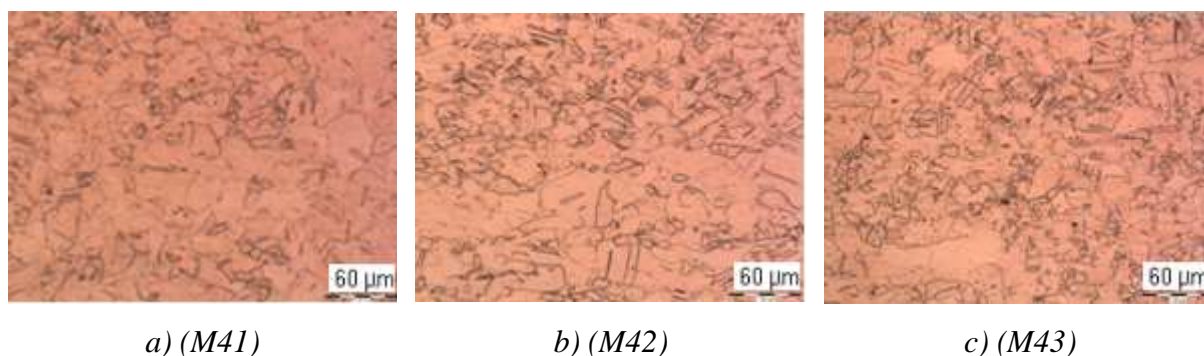
Je patrný i zřetelný rozdíl ve změně struktury u výchozího stavu a po protlačování (viz. obr. č. 4.1 c a 4.3 c) zejména v podélném řezu pásu plechu, kde je jsou zobrazeny hranice zrn.

4.2 Vliv počtu průchodů na velikost zrna Cu99,5

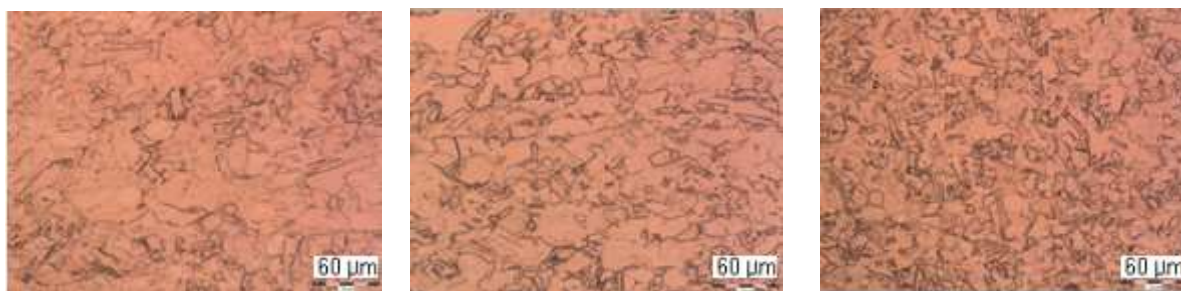
Vzorky byly metalograficky vyhodnoceny na optickém mikroskopu ve spolupráci s fakultou Metalurgie a materiálového inženýrství na VŠB-TUO, kde byla vyhotovena série metalografických analýz pomocí optického mikroskopu.



Obr. č. 4.4 Struktura vzorku plech Cu99,5 – výchozí stav (M0)



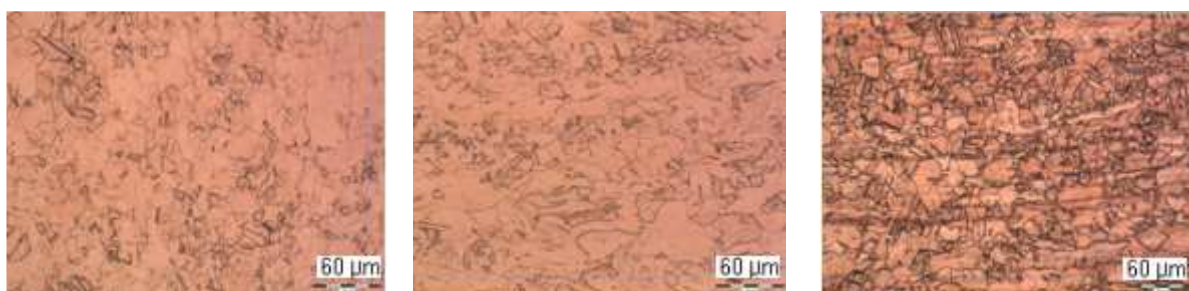
Obr. č. 4.5 Struktura vzorku plech Cu99,5 – 4. průchod (M4)



a) (M61)

b) (M62)

c) (M63)

Obr. č. 4.6 Struktura vzorku plech Cu99,5 – 6. průchod (M6)

a) (M81)

b) (M82)

c) (M83)

Obr. č. 4.7 Struktura vzorku plech Cu99,5 – 8. průchod (M8)

a) (M101)

b) (M102)

c) (M103)

Obr. č. 4.8 Struktura vzorku plech Cu99,5 – 10. průchod (M10)

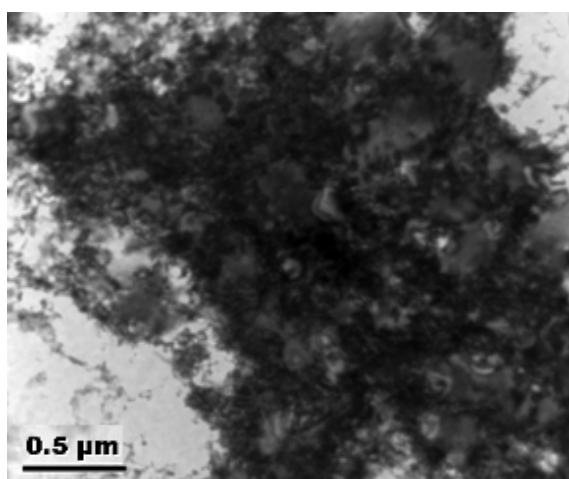
Z uvedené metalografické analýzy výchozího stavu plechu a po jednotlivých průchodech (zobrazeno na obr. č. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8) vyplývá poznatek, že dochází ke zjemnění struktury a pozvolné změně (zmenšení) střední velikosti zrna vlivem opakovaného protlačování nástrojem DRECE.

Hodnota střední velikosti zrna po 10. průchodu nástrojem DRECE je znatelně menší než u výchozího stavu. Vzhledem k tomu, že došlo ke zvýšení tvrdosti a projevilo se i zvýšení meze kluzu a meze pevnosti při tahových zkouškách. Tyto změny byly prokázány i

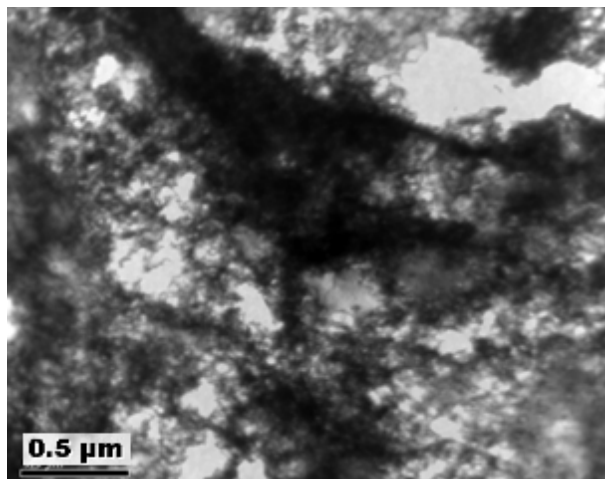
v submikrostruktúře (stanovení hustoty dislokací a rozložení dislokací pomocí TEM a SAED), jak je uvedeno na obrázcích č. 4.9, 4.10, 4.11 a 4.12.

Velikost zrna analyzována na TEM a model SAED:

Vyhodnocení struktury a příprava vzorku bylo provedeno ve spolupráci s Polskou akademií věd v Krakově. Velikost zrna byla analyzována na transmisním elektronovém mikroskopu (TEM). Na vyhodnocení byl použit vzorek plechu Cu99,5 po 10. průchodu nástrojem DRECE.



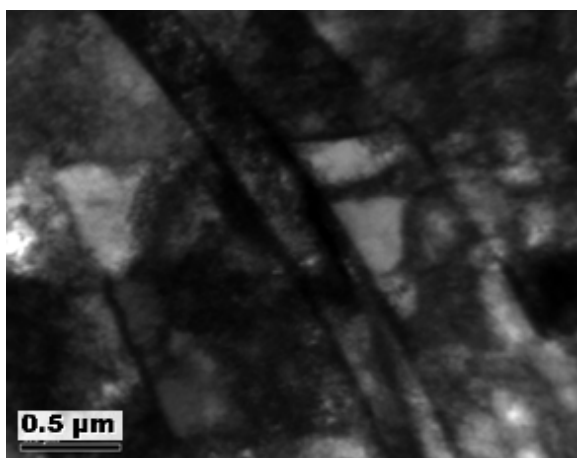
a)



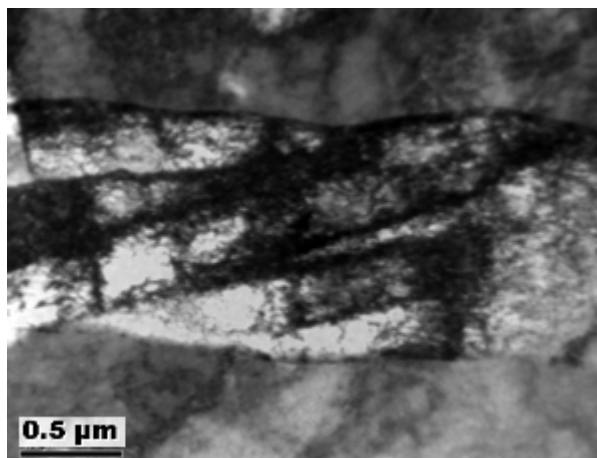
b)

Obr. č. 4.9 Struktura vzorku po 10. průchodu

Na obr. č. 4.9 je zobrazena struktura v pásu plechu po 10. průchodu nástrojem DRECE, kdy je patrné, že dochází k přerozdělení zrna. Převažuje dislokační struktura, která je charakterizována shluky dislokací a subzrnnou strukturou.



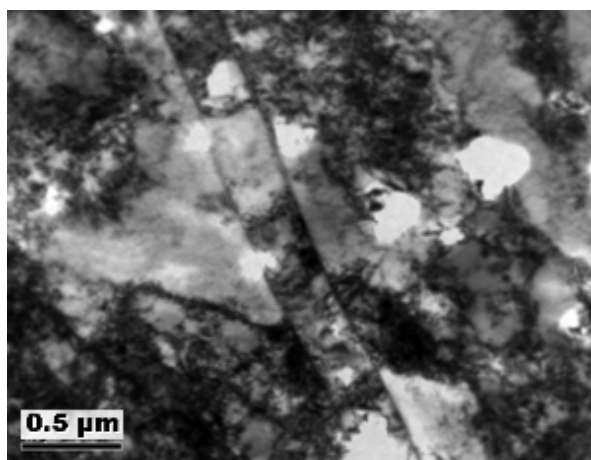
a)



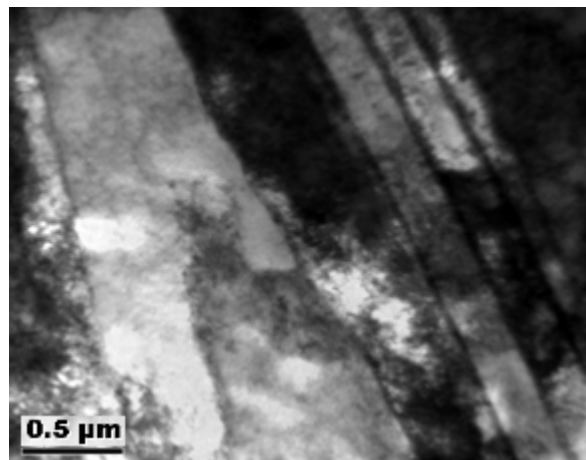
b)

Obr. č. 4.10 Struktura vzorku po 10. průchodu v jiném místě

Na obr. č. 4.10 je zobrazena struktura, kde je vidět vytváření jemného zrna, které je podélně deformováno ve střížných pásích.



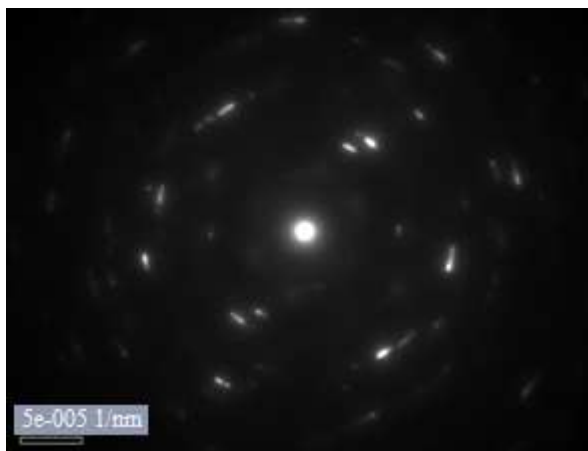
a)



b)

Obr. č. 4.11 Struktura vzorku po 10. průchodu v jiném místě

Na obr. č. 4.11 je vidět začínající se tvorba střížných pásů, ve kterých dochází k rozdrobení zrna.



a)



b)

Obr. č. 4.12 Model SAED po 10. průchodu

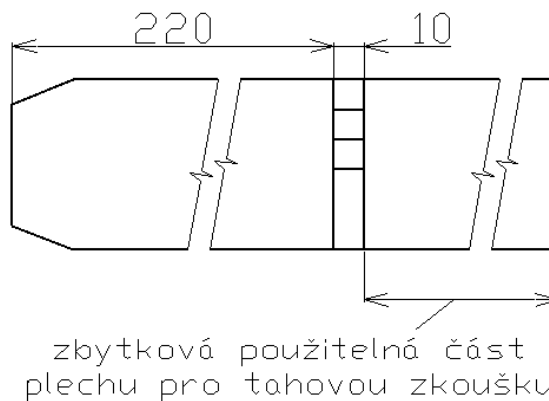
Analýza pomocí SAED po 10. průchodu je zobrazen na obr. č. 4.12. Je patrné, že nedošlo ještě k vytvoření vysokoúhlových hranic zrn. Jak už bylo zmíněno (obr. č. 4.9) převládá dislokační struktura.

5 ANALÝZA DOSAŽENÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PROCESEM DRECE

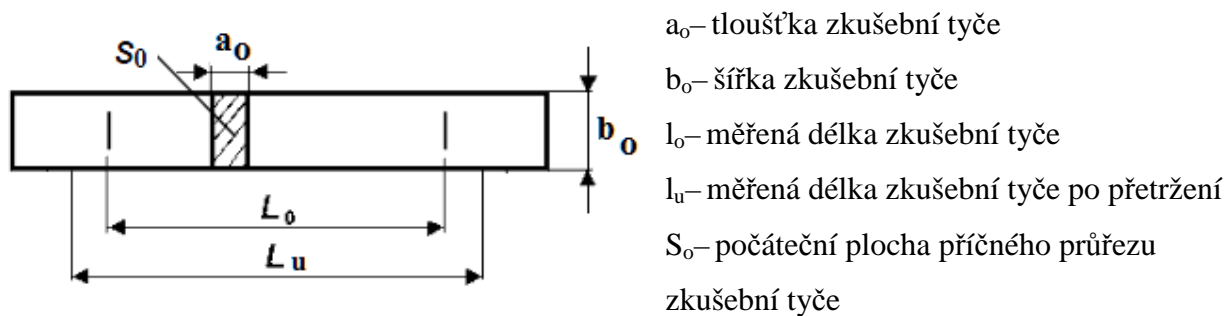
V záležitosti provádění mechanických zkoušek UFG materiálu je nutno přistupovat s omezeními danými zejména tvarem a velikostí hodnoceného materiálu, který byl zpracován obecně některou z technologií SPD. Základní problém je zajistit takovou úpravu zkušebních vzorků, která by umožňovala provedení modifikovaných zkoušek s dostatečným odpovídajícím výsledkem s výsledky zkoušek standardizovaných. [13]

V oblasti pro hodnocení mechanických vlastností UFG materiálů bylo zjištěno, že nejčastěji se používá pro hodnocení měření tvrdosti dle Vickerse pod nízkým napětím (v našem případě 50 N – viz kapitola 3.7.3). Měření tvrdosti dle Vickerse se vzhledem k jeho specifikaci jeví jako výhodné a bezproblémové. [13]

V laboratoři mechanických vlastností VÚHŽ Dobrá a.s. byly provedeny série tahových zkoušek na materiálech Al99,5 a Cu99,5 ve výchozím stavu, tak i po určitých průchodech. Tahové zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 10002-1 na zařízení FPZ 100/1. Byl použit plochý typ zkušební vzorku o rozměrech b_0 , a_0 , l_0 zobrazen na obr. č. 5.2. Rozměry vzorků před zkouškou a po zkoušce jsou uvedeny v tabulce č. 5.1 a č. 5.2.



Obr. č. 5.1 Označení místa na pásu plechu pro odběr tahové zkoušky



Obr. č. 5.2 Vzorek pro tahovou zkoušku

5.1 Analýza dosažených mechanických vlastností u Al99,5

Tab. č. 5.1 Tabulka tahových zkoušek z Al99,5

Pořadové číslo	Označení vzorku	Hodnoty tahové zkoušky												
		Před zkouškou				Po zkoušce				Zatížení na mezi kluzu $F_{p0,2}$ [N]	Zatížení na mezi pevnosti F_m [N]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]
		Tyč		S_0 [mm ²]	l_0 [mm]	Tyč		S_u [mm ²]	l_u [mm]					
		a_0	b_0			a_u	b_u							
1.	H0-1	1,7	12,6	21,4	25,0				30,5	1850	2100	86	96	22
2.	H0-2	1,7	12,6	21,4	25,0				29,7	1800	2100	84	96	18,8
3.	H4	1,9	58,7	111,5	80,0				96,8	10000	11500	90	103	21,0
4.	H6	1,9	58,7	111,5	80,0				103,0	9600	11000	86	99	28,8
5.	H8	1,9	58,6	111,3	80,0				*	8800	10200	79	92	*

H0-1 = 0. průchod, vzorek č.1

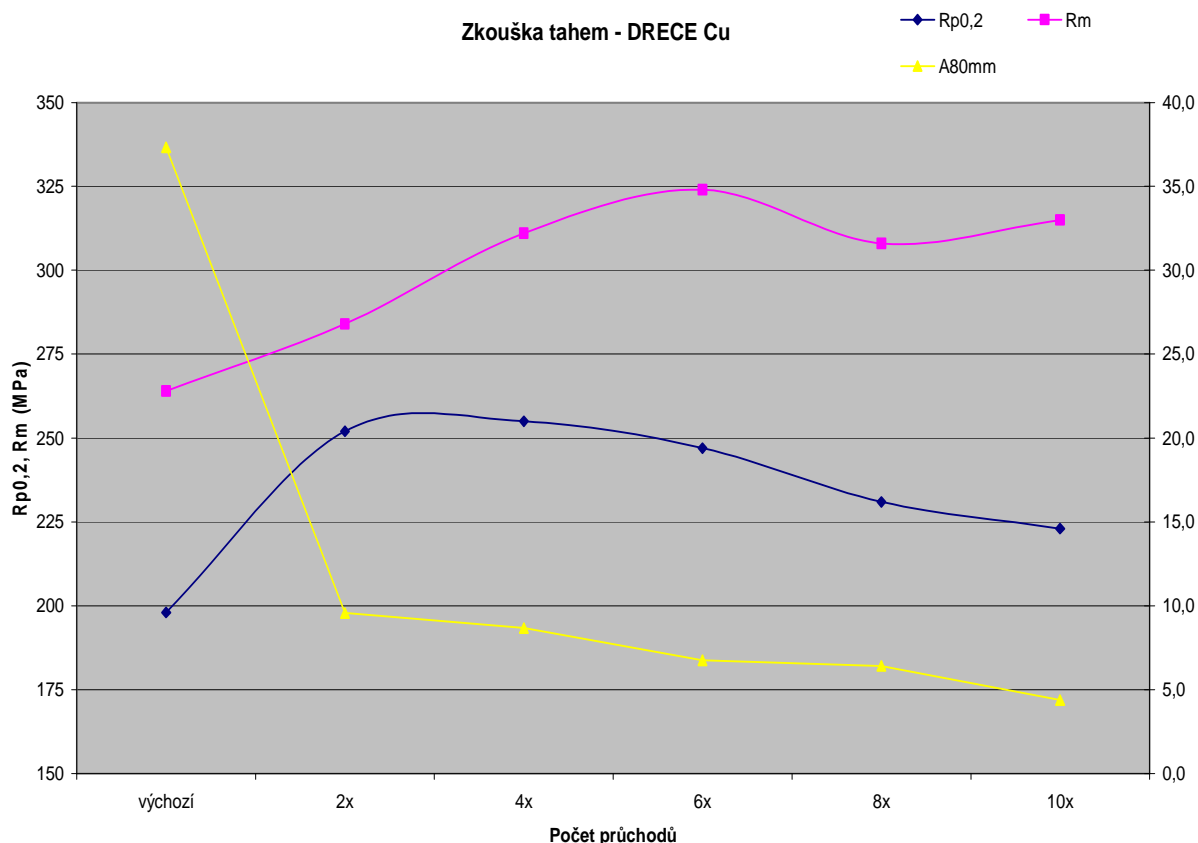
** - přetrženo ve značce*

5.2 Analýza dosažených mechanických vlastností u Cu99,5

Tab. č. 5.2 Tabulka tahových zkoušek z Cu99,5

Pořadové číslo	Označení vzorku	Hodnoty tahové zkoušky												
		Před zkouškou				Po zkoušce			Zatížení na mezi kluzu $F_{p0,2}$ [N]	Zatížení na mezi pevnosti F_m [N]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	
		Tyč		S_0 [mm ²]	l_0 [mm]	Tyč		S_u [mm ²]						l_u [mm]
		a_0	b_0			a_u	b_u							
		[mm]				[mm]								
1.	Cu0-1	2,0	12,5	25,0	30,0				41,2	4950	6600	198	264	37,3
2.	Cu0-2	2,0	12,5	25,0	30,0				43,9	4950	6600	198	264	46,3
3.	Cu0-3	2,0	12,5	25,0	30,0				43,8	4950	6650	198	266	46,0
4.	Cu0-4	2,0	12,5	25,0	30,0				42,0	4900	6600	196	264	40,0
5.	Cu2											252	284	9,6
6.	Cu4											255	311	8,7
7.	Cu6											247	324	6,8
8.	Cu8											231	308	6,4
9.	Cu10											223	315	4,4

Tahové zkoušky u pásu plechu Al99,5 neprokázali žádnou zvyšující hodnotu meze kluzu (tab. č. 5.1). Důvod může být způsobeno rekrytalizací materiálu, jak je zmíněno u měření tvrdosti. U vzorků z Cu99,5 docházelo ke zvyšování hodnoty meze kluzu a meze pevnosti na počtu průchodů, ale jen do 4. průchodu u meze kluzu a do 6. průchodu u meze pevnosti (viz graf. 5.1 a tab. č. 5.2).



Graf 5.1 Cu 99,5 zkouška tahem

6 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

6.1 Vyhodnocení dosažených hodnot intenzity deformace a napětí při matematické simulaci procesu DRECE

V této části se zabývám srovnáním dosažených výsledků numerické simulace pásu plechu z Al99,5 v programu Simufact.forming 9.0 při teplotě 20°C v procesu DRECE.

V tabulce 6.1 je zřetelný rozdíl mezi hodnotami intenzity deformace při zvyšujícím počtu průchodů. Z toho vyplývá, že dochází k deformačnímu zpevnění a ke změně struktury materiálu.

Z výsledku matematické simulace vyplývá jednoznačný závěr, že u protlačování pásu plechu, z hlediska dosažení dostatečného počtu střížných systémů (rovin) s různou jejich orientací, je nutno provést podstatně vyšší počet průchodů pro dosažení potřebné velikosti

intenzity deformace umožňující dosažení velkého zjemnění zrna. Vzhledem k povaze procesu je možno použít jen typ průchodu A nebo C. [13]

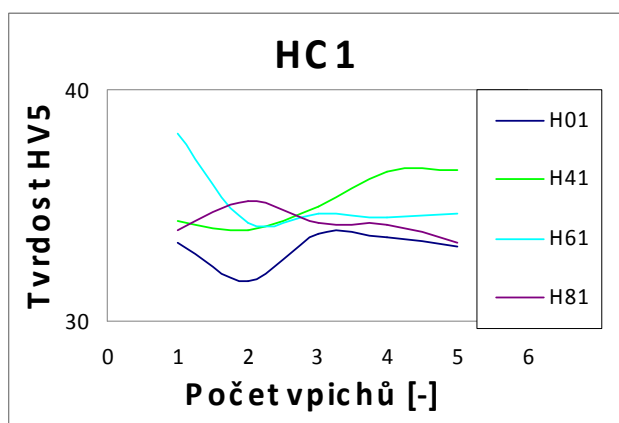
6.2 Vyhodnocení mechanických vlastností na experimentu Al99,5 a Cu99,5

6.2.1 Naměřené tvrdosti na Al99,5

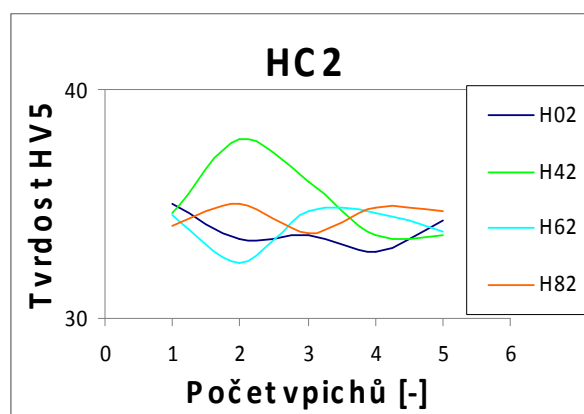
V tabulce č. 6.1 jsou naměřené celkové tvrdosti po 0 až 8 průchodech. V tabulce jde vidět, že hodnoty tvrdostí nestoupaly (při více průchodech hodnota tvrdosti zůstala stejná). Na grafech 6.4, 6.5, 6.6 jsou znázorněny celkové hodnoty tvrdostí dosažených na různých vzorcích odebraných z pásu plechu po různých počtech průchodů. Je zřejmé, že vlivem rekrytalizačních pochodů nedochází k podstatnému nárůstu hodnot tvrdosti.

Tab. č. 6.1 Celková tabulka tvrdostí HV5 při různých průchodech pásu plechu Al99,5

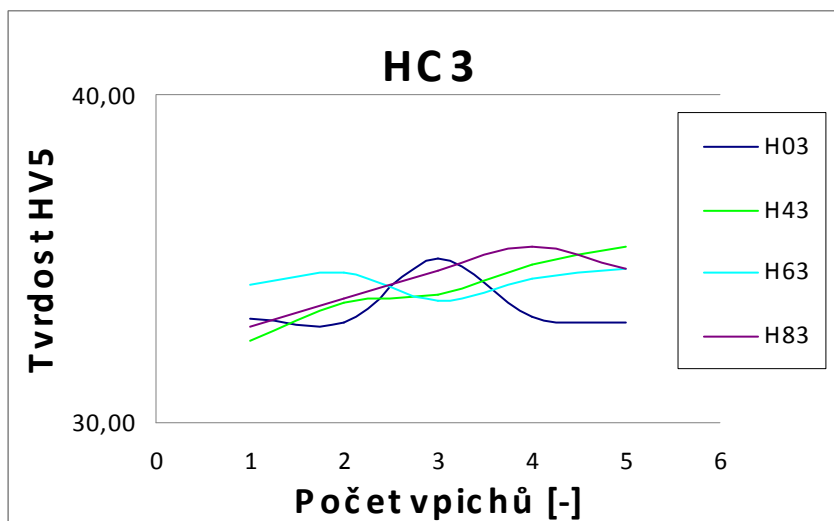
Průchod	Průměrná hodnota tvrdosti HV5		
	HX1	HX2	HX3
0	33,1	33,9	33,52
4	35,2	35,1	34,04
6	35,3	34,0	34,31
8	34,2	34,4	34,27



Graf 6.1 Celkový graf tvrdostí na vzorcích HX1



Graf 6.2 Celkový graf tvrdostí na vzorcích HX2



Graf 6.3 Celkový graf tvrdostí na vzorcích HX3

6.2.2 Tahové zkoušky provedené na Al99,5

Tab. č. 6.2 Celkové dosažené hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m Al99,5

Průchod	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]
0.	86	96
4.	90	103
6.	86	99
8.	79	92

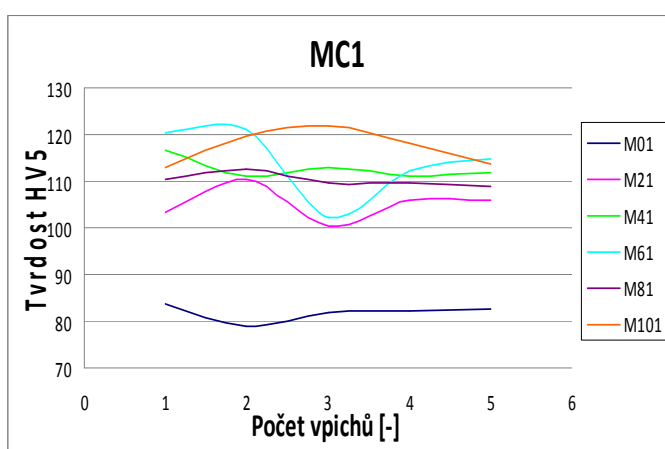
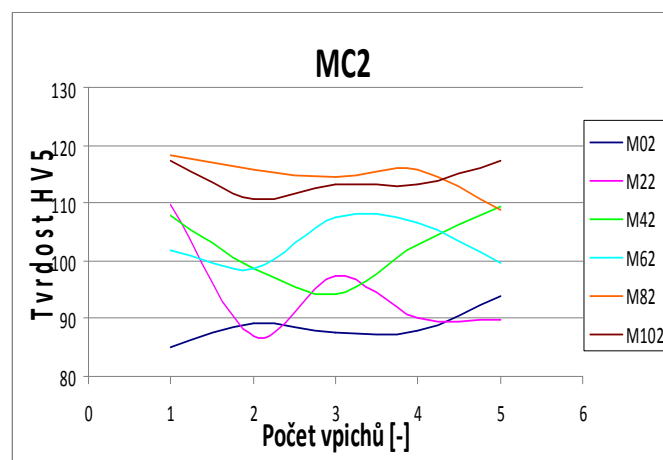
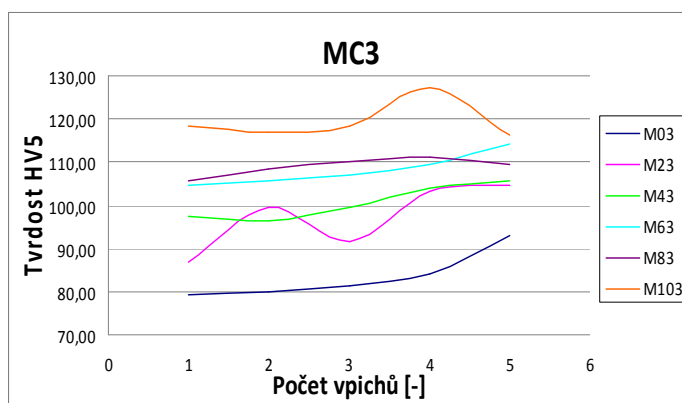
U tahových zkoušek u pásu plechu Al99,5 nedocházelo k žádné změně hodnoty meze kluzu a meze pevnosti z důvodu rekrystalizací materiálu (tab. č. 6.2). Zařízení DRECE potvrzuje využitelnost pro slitiny na bázi Al, ale ne pro čistý Al, kde se projevuje po tváření vysoká úroveň vrstevné chyby a je nutno ihned provádět vhodné tepelné zpracování.

6.2.3 Naměřené tvrdosti na Cu99,5

V tabulce č. 6.3 jsou naměřené celkové tvrdosti po 0 až 10 průchozech. V tabulce jde vidět, že hodnoty tvrdostí stoupaly (při více průchozech hodnota tvrdosti stoupala). Na grafech 6.4, 6.5, 6.6 jsou znázorněny celkové hodnoty tvrdostí dosažených na různých vzorcích odebraných z pásu plechu porůzných počtech průchodů. Je zde patrné podstatné zvýšení tvrdosti v závislosti na narůstajícím počtu průchodů.

Tab. č. 6.3 Celková tabulka tvrdostí HV5 při různých průchodech pásu plechu Cu99,5

Průchod	Průměrná hodnota tvrdosti HV5		
	MX1	MX2	MX3
0	81,8	88,7	83,56
2	105	94,8	97,27
4	112,6	102,6	100,61
6	114,2	102,9	108,20
8	111,9	113,9	108,97
10	117,2	114,4	119,36

Graf 6.4 Celkový graf tvrdostí
na vzorcích MX1Graf 6.5 Celkový graf tvrdostí
na vzorcích MX2

Graf 6.6 Celkový graf tvrdostí na vzorcích MX3

6.2.4 Tahové zkoušky provedené na Cu99,5

Tab. č. 6.4 Celkové dosažené hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m Cu99,5

Průchod	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]
0.	198	264
2.	252	284
4.	255	311
6.	247	324
8.	231	308
10.	223	315

U vzorků z Cu99,5 naopak docházelo ke zvyšování hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v závislosti na počtu průchodů (tab. č. 6.4), což potvrzuje využitelnost zařízení DRECE pro slitiny na bázi Cu. Materiál nevykazuje zvýšené mechanické vlastnosti prakticky po 6. průchodu, tzn. že vysokých mechanických vlastností dosahujeme při nižším počtu průchodů, vzhledem k teoretickému předpokladu a dle nejnovějších poznatků uváděných v odborné literatuře. Pro více jak 8 průchodů je proces DRECE neefektivní.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla matematická simulace procesu protlačování zařízením DRECE programem Simufact.forming a i následného provedení experimentu na tomto zařízení. Dále pak porovnání dosažených výsledků z experimentů s matematickou simulací. Byly také provedeny metalografické analýzy po narůstajících počtech průchodů a určen jejich vliv na výslednou strukturu. V závěru prací byla provedena souhrnná analýza dosažených výsledků, kdy byly hodnoceny i mechanické vlastnosti pomocí tahových zkoušek pro materiály - Al99,5 a Cu99,5.

Při protlačování vzorků plechů z Al99,5 a Cu99,5 zařízením DRECE při více průchodech byla dosažena zvyšující se hodnota velikosti intenzity deformace. S narůstajícím počtem průchodů hodnota deformace se zvyšuje. Hodnota intenzity napětí má také stoupající tendenci v závislosti na počtech průchodů.

Na vzorcích pásů plechů Al99,5 a Cu99,5 bylo naměřeno, že při zvyšujícím počtu průchodů je také zřetelný rozdíl mezi hodnotami tvrdostí. Z toho vyplývá, že dochází k deformačnímu zpevnění a ke změně struktury materiálu. Dochází ke změně velikosti zrna.

Došlo k potvrzení výsledků z matematické simulace v porovnání s vykonaným experimentem, kdy bylo prokázáno značné deformační zpevnění u Cu plechu. Intenzita deformace, vedoucí ke zjemnění zrna se zvyšovala v závislosti na počtu průchodů.

Z uvedených metalografických analýz výchozího stavu plechu Al99,5 a po jednotlivých průchodech vyplývá, že dochází k pozvolné změně (zmenšení) střední velikosti zrna po jednotlivých průchodech nástrojem DRECE, ale u materiálu Al99,5 není tak podstatná, jako u materiálu Cu99,5.

Hodnoty tvrdostí u materiálu Al99,5 nestoupaly (při více průchodech hodnota tvrdosti zůstala stejná). Důvodem tohoto jevu je, že dochází k rekrytalizaci materiálu a to vede ke ztrátě mechanických vlastností.

Naopak hodnoty tvrdostí u materiálu Cu99,5 stoupaly (při více průchodech hodnota tvrdosti stoupala). Materiál Cu99,5 má lepší vlastnosti pro protlačování nástrojem DRECE.

U tahových zkoušek u pásu plechu Al99,5 nedocházelo k žádné změně hodnoty meze kluzu a pevnosti z důvodu rekrytalizace materiálu. U vzorků z Cu99,5 naopak docházelo ke zvyšování hodnoty meze kluzu a pevnosti s narůstajícím počtem průchodů (do 6. průchodu).

Výsledky zpracované v této práci zejména výsledky na pásu plechu Cu99,5 se jeví jako dále použitelné pro další zpracování. Pro dosažení lepších vlastností materiálu se výzkum zaměří na návrh vhodného tepelné zpracování pro materiál z Al.

Zařízení DRECE je z hlediska funkčnosti zkonstruováno na velmi dobré technické úrovni. V dalších ověřovacích pracích bude zkoumán vliv rychlosti deformace na výslednou strukturu, bude provedena optimalizace frekvence procesu mazání, ověření vlivu velikosti síly a přítlačných válců na proces protlačování. Podmětem dalšího vývoje by se měly ověřit hodnoty matematické simulace při více průchodech nástrojem DRECE a ověřit s experimentem.

Prokázalo se také, že matematické simulace jsou důležitými součástmi výzkumu, které nám mohou zjistit nepříznivé vlivy a výsledky simulace pomáhají ke srovnání s výsledky experimentu.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc., Ing. Janu Kedroňovi, Ing. Stanislavu Tylšarovi a Bc. Michalovi Salajkovi z VŠB-TU Ostrava za pomoc při provádění experimentů a při řešení diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TATSUYA, T. - KAZUHIKO, O. - SABUROV, T. Precise Extrusion Technology by Conform Process for Irregular Sectional Copper, *Hitachi Cable Review*, No. 21 (August 2002).
- [2] SHUBO, X. – GUOQUN, Z. – XUFANG, R. – YANJIN, G. Numerical investigation of aluminum deformation behavior in three-dimensional continuous confined strip shearing process, *Materials Science and Engineering A*, 476 (2008), p. 281-289.
- [3] HUI, Z. – QIQI, Y. – LUOXING, L. Microstructures and tensile properties of AZ31 magnesium alloy by continuous extrusion forming process, *Materials Science and Engineering A*, 486 (2008), p. 295-299.
- [4] KOPŘIVA, M. *Počítačová podpora technologie*, Brno, 2002, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno, Odbor tváření kovů a plastů, str. 13-16.
- [5] QForm: *Nejjednodušší simulační systém*. Krok za krokem, Verze 2.1, *Quantor Ltd.*
- [6] FormFEM 2.1: *Program pro simulaci tváření rovinných a rotačně symetrických těles – uživatelská příručka*, ITA s.r.o., březen 2008.
- [7] SIMUFACT. *Simufact.forming 9.0 software, Overview* [online], [cit. 14. dubna 2010], Dostupné z [www <http://www.simufact.de/en/solutions/sol_form.html>](http://www.simufact.de/en/solutions/sol_form.html).
- [8] KEDROŇ, J. *Simulace protlačování slitin AlMn1Cu a ALFe1,5Mn klasickým a upraveným nástrojem ECAP*, Ostrava: 2009, Diplomová práce na Fakultě strojní VŠB-Technické univerzity Ostrava na katedře mechanické technologie.
- [9] PENGUYUE, W. - YUCAI, W. - SHUISHENG, X. - GUOIJIE, H. Numerical Simulation on Conform Process of Aluminium Alloy Rectangular Hollow Conductor, *Materials Science Forum*, Vol. 546-549 (2006), p. 735-740.
- [10] RUSZ, S. - MALANÍK, K. - KEDROŇ, J. - SKOTNICOVÁ, I. Nové poznatky z vývoje a zkušebního provozu prototypového zařízení DRECE: *sborník příspěvků mezinárodní konference NANOCON*, Rožnov pod Radhoštěm 20. - 22. října 2009 [online], Dostupné z [www <http://www.nanocon.cz/data/nanocon2009/sbornik/Lists/Papers/019.pdf>](http://www.nanocon.cz/data/nanocon2009/sbornik/Lists/Papers/019.pdf).
- [11] *Lexikon technických materiálů 3.0* [počítačový program], srpen 2003

- [12] GLEIT - $\mu^{\text{®}}$ HP 515. *Manuál k mazivu GLEIT - $\mu^{\text{®}}$ HP 515, Overview* [online], [cit. 14.dubna 2010], Dostupné z [www](http://www.wessely.co.at/cms/cms/dbfs.php?file=dbfs:/neudaten/pi_hp515_de.pdf)
<http://www.wessely.co.at/cms/cms/dbfs.php?file=dbfs:/neudaten/pi_hp515_de.pdf>
- [13] RUSZ, S., MALANÍK, K. Průběžná zpráva projektu MPO č. 2A-1TP1/124 – Trvalá prosperita – Výzkum vlivu extrémních podmínek deformace na submikrostrukturu kovů a zkušebních metod pro diagnostiku jejich technologických vlastností, září, 2009, pp. 1-15

PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TOUTO PRACÍ

STEIDL, J. *Matematická simulace technologie protlačování materiálů zaměřena na zefektivnění procesu vícenásobné plastické deformace*, Ostrava: 2008, Bakalářská práce na Fakultě strojní VŠB-Technické univerzity Ostrava na katedře mechanické technologie.

Seznam příloh

- [1] Médium s prací v elektronické podobě